

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 408

ISSN 1213-418X

Radek Vlach

**CHLAZENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ -
NOVÉ PŘÍSTUPY PŘI ŘEŠENÍ
TEPELNÝCH PROCESŮ
PROBÍHAJÍCÍCH
V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH**

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Ing. Radek Vlach, Ph.D.

**Chlazení elektrických strojů – nové přístupy při řešení tepelných
procesů probíhajících v elektrických strojích**

Cooling of Electric Machines – new approaches to solve thermal
processes in electrical machines

Teze habilitační práce
v oboru Aplikovaná mechanika



Brno 2011

Klíčová slova

Termomechanika, hydromechanika, elektrické stroje, tepelné sítě, modelování, oteplovací zkouška

Keyword

Thermodynamics, Hydromechanics, electric machines, thermal networks, modeling, heating test

Místo uložení práce

Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2

Obsah

Představení autora.....	4
1. Úvod	5
2. Formulace cílů a jejich řešení	5
3. Ventilace elektrických strojů	7
3.1 Hydraulické odpory rotujících částí elektrického stroje	7
3.1.1 Rotující kruhové kanály	7
3.1.2 CFD modelování vlivu rotace na proudění v axiálních kanálech rotoru	7
3.1.3 Vstup do rotorové hvězdy	9
3.1.4 CFD modelování vstupu do rotorové hvězdy	9
3.1.5 Vzduchová mezera	10
3.1.6 CFD modelování proudění ve vzduchové mezeře	10
4. Tepelné procesy v elektrických strojích	12
4.1 Metoda trojrozměrné tepelné sítě	12
4.1.2 Transientní stav	14
4.1.3 Náhradní tepelná síť tělesa s chladicím kanálem	14
4.2 Tepelná síť toku chladiva	15
4.3 Komplexní tepelná síť elektrického stroje	16
5. Ověření metody trojrozměrné tepelné sítě	17
5.1 Analýza tepelného stavu statoru synchronního motoru	17
5.2 Elektrický stroj s radiálními ventilačními kanály – IP23 IC 01	18
5.3 Elektrický stroj s radiálními ventilačními kanály – IP23 IC 01 51	20
5.4 Trakční stroj s vnějším zdrojem ventilace – IP23 IC 37	21
6. Oteplovací zkouška	23
7. Závěr	25
7.1 Aktuálnost řešené problematiky	25
7.2 Shrnutí obsahu práce	25
7.3 Přínos práce	27
7.4 Náměty a možnosti dalšího využití	28
Seznam symbolů	29
Použitá literatura	31
Související publikace autora	31
Abstrakt	32
Abstract	32

Představení autora

Radek Vlach se narodil v r. 1975 v Brně. Vysokoškolské vzdělání získal v oboru Aplikovaná mechanika na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně v roce 1998 složením státní závěrečné zkoušky a obhajobou diplomové práce „Experimentálně-výpočtové modelování vlastností a chování mechanické části vypínače pro vysoké napětí“.



V letech 1998-2002 absolvoval pod vedením školitele doc. Ing. Čestmíra Ondrůška, CSc. doktorské studium. Za dizertační práci „Řízení ventilace elektrického stroje s využitím umělé inteligence“, obhájenou v r. 2002, získal cenu SIEMENS. Během studia absolvoval tříměsíční studijní stáž na univerzitě Nottingham ve Velké Británii a také několik kratších pobytů na univerzitách v Polsku.

Významným impulzem pro další práci byla úzká spolupráce s firmou VUES Brno, která navázala na Výzkumný ústav elektrických strojů. Na základě této spolupráce se autor zaměřil na výzkum a vývoj v oblasti ventilace a chlazení elektrických strojů. Předmětem jeho zájmu se tak stala jednak oblast ventilačního a tepelného měření, ale především vývoj komplexních metod popisujících tepelné procesy, probíhající v elektrických strojích.

Autor byl hlavním řešitelem projektů GAČR GP101/05/P081 „Výzkum netradičních metod chlazení elektrických strojů“, MPO projektu FD-K/044 „Vývoj univerzálního závěru balistických měřidel dle norem NATO a C.I.P.“ a FSI projektu BD 1343021 „Návrh měřicího zařízení pro stanovení přestupu tepla z rotoru elektrického stroje do vzduchové mezery“. Autor se aktivně podílel na řadě projektů ministerstva průmyslu a obchodu ČR a výzkumných záměrech MSM 262100024 „Výzkum a vývoj mechatronických soustav“ a MSM 0021630518 „Simulační modelování mechatronických soustav“. Rovněž se podílel na řadě vývojových úkolů z průmyslové praxe (VUES Brno, TES Vsetín, SIEMENS Drásov, atd.), přičemž je spoluautorem několika prototypů.

V pedagogické oblasti pracoval na projektech FRVŠ 3273/2011 G1 „Platforma pro výuku simulačního modelování a řízení elektrohydraulických systémů“ a 2312/2011 F1a „Řízení reálných dynamických soustav z prostředí Matlab/Simulink - inovace dvou předmětů oboru mechanika“.

Odborné zájmy zahrnují tepelnou analýzu elektrických strojů a zařízení, analýzu proudění v elektrických strojích a zařízeních, mechanickou analýzu strojních součástí, elektromagnetickou analýzu elektrických strojů a zařízení, ventilační a tepelné měření elektrických strojů a zařízení. Je autorem nebo spoluautorem více než 20 článků v časopisech a na vědeckých konferencích, z toho dvou článků v impaktovaných časopisech.

Vytvořil a garantuje předměty „Tepelné procesy v mechatronických soustavách“, ke kterým napsal skripta a „Počítačové metody v silnoproudé elektrotechnice“, které vyučuje na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií.

1. Úvod

V dnešní době jsou kladeny požadavky na komplexnější přístup k řešení problémů ve všech technických odvětvích. Stále častěji se volá po takzvaném mechatrickém přístupu, který spočívá v pohledu na technické zařízení nebo jinou soustavu, jako kombinaci elektrické, mechanické, řídicí a případně dalších částí, které se vzájemně ovlivňují. Jinak tomu není ani v oblasti chlazení elektrických strojů, kde se vzájemně ovlivňují návrhy elektromagnetický, ventilační, tepelný, mechanický a akustický s konstruováním stroje. Chlazení se stále více stává jednou z částí návrhu elektrického stroje, která může značně ovlivnit jeho efektivnost využití.

Při základním pohledu na jakékoliv technické zařízení dochází k přeměně jednotlivých druhů energie – elektrické, mechanické, tepelné, hydraulické atd. Typickým případem je elektrický stroj, kde dochází s určitou účinností k přeměně elektrické energie na energii mechanickou, pokud uvažujeme, že elektrický stroj pracuje v motorickém režimu. Rozdíl mezi energií elektrickou a mechanickou představuje teplo, které je potřeba efektivně ze stroje odvést, jinak by došlo ke snížení funkčnosti, případně i zničení.

Tato práce se zabývá současnými trendy a popisuje vývoj nových přístupů při modelování tepelných procesů probíhajících v elektrických strojích. V současné době je snahou navrhnout elektrický stroj na hranici použitelnosti, lépe řečeno docílit nejvyšší poměr výkon-hmotnost. K tomuto účelu je nutné mít nejpřesnější výpočtové metody, na jejichž základě lze tyto požadavky docílit. Rovněž při návrhu elektrického stroje hraje významnou roli rychlost výpočtu, respektive jak jsme schopni prověřit vliv jednotlivých variant systému chlazení na zbývající části (elektromagnetická, mechanická atd.) návrhu elektrického stroje.

2. Formulace cílů a jejich řešení

Z hlediska celkového návrhu elektrického stroje je v současné době znalost tepelných procesů probíhajících v elektrickém stroji nezbytnou součástí, bez které není možné navrhnout optimální konstrukci. Tato část návrhu elektrického stroje je dosti často opomíjena a má za následek zbytečné předdimenzování stroje nebo naopak poddimenzování a v nejhorším případě zničení stroje. Tyto problémy se často projeví až při typové zkoušce, kdy je již pozdě na nějakou nápravu.

S rozvojem nejmodernějších výpočetních metod vše nasvědčuje představě, že modelování tepelných procesů je již snadnou záležitostí. Především jde o simulační prostředí založené na metodě konečných prvků a zejména takzvaném CFD modelování (computational fluid dynamic). Podrobnějším rozбором výpočtových programů založených na metodách konečných prvků a CFD modelování je možné konstatovat, že jsou příliš obecné, ale naopak není možné zahrnout (nebo jen obtížně) některé speciální aspekty, které se vyskytují především v elektrických strojích.

Pro komplexnější začlenění tepelného výpočtu do celkového návrhu elektrického stroje se jeví jako výhodnější modelování tepelných procesů pomocí náhradní tepelné sítě. Touto problematikou se zabývá celá řada publikací. Nevýhodou modelování pomocí tepelné sítě je náhrada částí stroje pouze jedním uzlem, ve kterém jsou případně koncentrovány ztráty. Ve skutečnosti jsou však ztráty rovnoměrně rozděleny do celého objemu. Tato skutečnost zavádí do výpočtu chybu, která je závislá na diskretizaci geometrie, respektive počtu uzlů nahrazujících určitý objem. Proto je například použita metoda, kdy je jeden globální uzel nahrazen pro zjištění detailnějšího rozložení teploty několika desítkami až stovkami uzlů. Tím se řešení však začíná blížit metodě konečných prvků a roste tím výpočetní náročnost. Podstatně detailněji se problémem náhrady objemu jedním uzlem zabýval prof. Mukosej, kdy odvodil náhradní tepelnou síť založenou na analytickém řešení jednorozměrného vedení tepla,

přičemž s jejím využitím je možné kompenzovat koncentraci ztrát do jednoho uzlu a zároveň příčné chlazení. Tímto problémem se rovněž zabývala skupina ve Výzkumném ústavu elektrických strojů v Brně, jejímž výsledkem je zavedení takzvaného vnitřního tepelného odporu. Všechny tyto metody však řeší pouze jednorozměrné vedení tepla, což se v elektrickém stroji vyskytuje zcela zřídka. Do výpočtu se tak zavádí chyba, která může mít v některých případech zásadní vliv na přesnost výpočtu.

S rozvojem metody náhradní tepelné sítě je prakticky nezbytné do výpočtu zahrnout vliv oteplování chladiva průchodem stroje. Dříve se tento vliv zanedbával, nebo se oteplení chladiva odhadovalo. V prvních pokusech o zavedení tepelné sítě toku chladiva se však používala (často se však stále používá) výstupní teplota chladiva jako vztažná. Postupem času se stále více používá střední teplota oteplení chladiva v daném úseku jako vztažná teplota. Jak vyplývá z publikací, vzhledem k obtížnostem sestavování tepelné bilance toku chladiva (je nutné sledovat směr proudění), jsou řešeny pouze toky jednou, případně dvěma větvemi.

Samostatnou oblastí, která by mohla přispět ke snížení časové náročnosti a tím pádem i finančních nákladů, je oteplovací zkouška zejména velkých strojů s výkonem nad 1MW. V podstatě jde o snahu predikovat z části průběhu naměřené teploty ustálenou teplotu. Tím by se podstatně zkrátil celkový čas potřebný na oteplovací zkoušku, který se pohybuje v jednotkách hodin. V elektrických strojích se tímto problémem prakticky nikdo nezabývá.

Z doposud uvedeného rozboru a také z plného textu habilitační práce je zřejmé, že problematika chlazení elektrických strojů je stále aktuálním tématem. Přičemž zde existuje stále celá řada oblastí, které se jeví jako studijně, vědecky a prakticky aktuální problém. Cílem této práce je nalézt odpovědi na některé otázky a přispět k rozvoji zejména výpočetních metod pro popis tepelných procesů probíhajících v elektrických strojích. Vývojem a výzkumem některých problematických oblastí chlazení elektrických strojů, které byly nastíněny v předešlém textu a přispějí k řešení hlavního cíle této práce, se budou zabývat následující dílčí cíle:

- Posouzení vlivu geometrického uspořádání a zejména otáček na stanovení ztrátových součinitelů, respektive hydraulických odporů hydraulických sítí.
- Vývoj metody trojrozměrné tepelné sítě
 - hranol, mezikruží
 - přechodový stav
 - trojrozměrná tepelná síť s chladicím kanálem.
- Algoritmizace sestavení tepelné bilance obecně větvené tepelné sítě toku chladiva.
- Komplexní tepelná síť
 - vzájemná interakce trojrozměrné tepelné sítě (solid) a tepelné sítě toku chladiva (fluid)
 - algoritmizace struktury matice vodivostí (solid, fluid) a vektoru zdrojů.
- Vývoj algoritmu pro predikci ustálené (oteplování), případně počáteční (ochlazování) teploty během oteplovací zkoušky.

3. Ventilace elektrických strojů

Prvním krokem a také základním kriteriem při návrhu chlazení elektrických strojů je návrh ventilačního systému zajišťujícího co nejefektivnější odvod tepelných ztrát ze stroje. Bez dobře navrženého modelu ventilačního systému není možné i při nejpřesnějším popisu tepelných procesů probíhajících v elektrickém stroji stanovit uspokojivě jeho tepelný stav.

3.1 Hydraulické odpory rotujících částí elektrického stroje

Rotující části elektrického stroje jsou nedílnou součástí každého točivého elektrického stroje, proto zpřesnění výpočtu hydraulických odporů, popisujících proudění v těchto částech, jsou velmi důležité. Využití CFD modelování pro stanovení hydraulických odporů, respektive odporových součinitelů, pro konkrétní elektrické stroje je v těchto případech vhodné. Podrobnější rozbor této problematiky je uveden v plném textu habilitační práce. Dále tedy budou uvedeny pouze nejdůležitější výsledky pro případy rotujícího kanálu, vstupu do rotorové hvězdy a vzduchové mezery.

3.1.1 Rotující kruhové kanály

Jedním z případů, vyskytujícího se velmi často ve ventilačních systémech elektrických strojů, jsou axiální kanály v rotoru. Jde tedy o kanály rotující kolem osy rovnoběžné s osou kanálu (směru proudění). V hydraulických sítích jsou tyto kanály popsány pomocí tří hydraulických odporů zapojených v sérii. Jedná se o odpory vstupu, tření a výstupu. Každý hydraulický odpor je dán obecně vztahem [A1]

$$K = \xi \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{1}{S^2}, \quad (3.1)$$

kde ξ značí příslušný odporový součinitel, ρ je hustota a S je vztažný průřez v místě odporového součinitele.

Jelikož všechny tři hydraulické odpory popisující rotorový kanál jsou řazeny v sérii, je možné je sečíst a tím obdržet po úpravě celkový odporový součinitel ve tvaru

$$\xi_r = (\xi_0^i + \xi_0^e) \cdot \left(1 + a \cdot \left(\frac{u}{v_{ax}} \right) + b \cdot \left(\frac{u}{v_{ax}} \right)^2 \right)^2 + \lambda_0 \cdot \frac{L}{D} \cdot \left(1 + c \cdot \left(\frac{u}{v_{ax}} \right)^d \right), \quad (3.2)$$

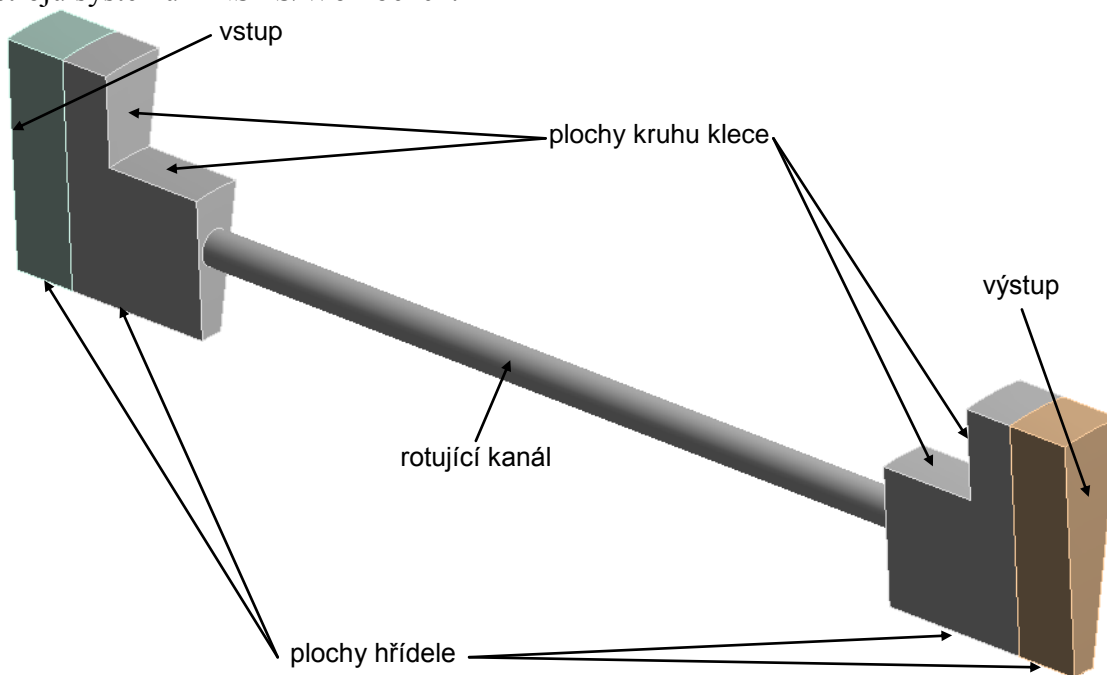
kde $\xi_0^{i,e}$ je odporový součinitel vstupu nebo výstupu bez vlivu rotace, u je obvodová rychlost rotujícího kanálu a v_{ax} je střední rychlost proudění v kanále. Konstanty a , b , c a d jsou závislé na konkrétním případě konstrukčního uspořádání. Tyto konstanty je možné stanovit na základě experimentu, nebo jak tomu bude v tomto případě pomocí CFD modelování.

3.1.2 CFD modelování vlivu rotace na proudění v axiálních kanálech rotoru

Vliv rotace na proudění v axiálních rotorových kanálech bude ověřeno na konkrétním elektrickém stroji, který bude dále analyzován z hlediska tepelného stavu. Jedná se o asynchronní stroj s klecí a kruhovými kanály ve jhu svazku plechů. Tento stroj pracuje jako trakční motor s proměnnými otáčkami a průtokem chladiva. Proto je třeba popsat ventilaci stroje v závislosti na rychlostních poměrech, čímž je v podstatě míněno stanovení závislosti hydraulického odporu rotoru, respektive odporového součinitele (3.2) v závislosti na poměru obvodové a axiální rychlosti.

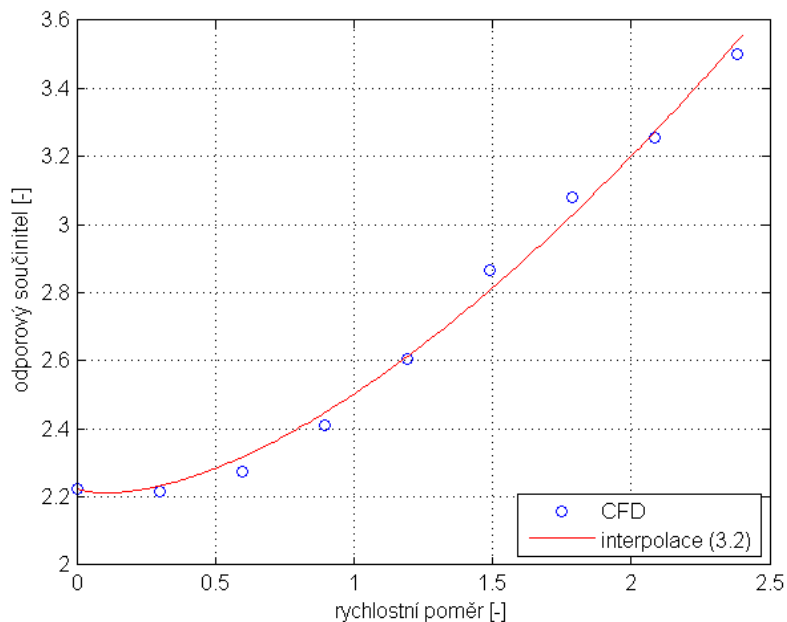
Vzhledem k symetrii stroje je možné modelovat pouze výseč rotoru zahrnující jeden axiální kanál. Výpočtový model (obr. 3.1) odpovídá z hlediska geometrie skutečnému rotoru, který je tvořen kanálem, prostorem pod kruhy klece a odpovídajícím vstupním a výstupním

prostorem. Pro modelování byl využit systém FLUENT, který je již součástí simulačních nástrojů systému ANSYS/Workbench.



Obr. 3.1: CFD model rotorového kanálu

Pomocí nelineární regrese byla provedena interpolace dosažených výsledků (obr. 3.2) CFD modelováním závislostí (3.2). Úspěšnost interpolace je vyjádřena kvadratickou korelací, která vyjadřuje shodu mezi vypočtenými hodnotami pomocí CFD a vztahem (3.2). Kvadratická korelace dosahuje shodu 99.4%.



Obr. 3.2: Závislost odporového součinitele rotorového kanálu na rychlostním poměru obvodové a axiální rychlosti v kanále

3.1.3 Vstup do rotorové hvězdy

Dalším velmi často vyskytujícím se případem ve ventilačních systémech, zejména u velkých strojů s radiálními kanály, je stanovení hydraulického odporu vstupu do rotorové hvězdy. Tento hydraulický odpor je opět značně ovlivněn rotací, ale také může být ovlivněn geometrickým uspořádáním hřídelové hvězdy. Odpověď na otázku proč se tímto uzlem ventilačního systému zabývat je jednoduchá, jelikož se jedná o nejkritičtější místo celého ventilačního okruhu.

Hydraulický odpor je dán obecně známým vztahem (3.1). Pouze je třeba brát v úvahu průřez mezi žebry rotorové hvězdy

$$S_{th} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{1r}^2 - D_h^2) - N_z \cdot B_z \cdot \frac{D_{1r} - D_h}{2}, \quad (3.3)$$

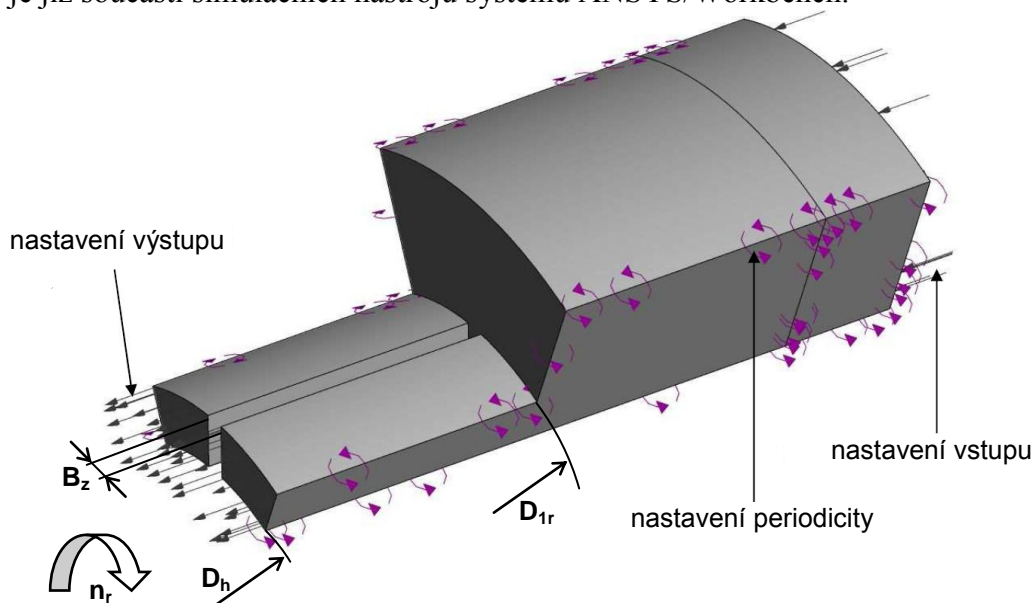
kde D_{1r} je vnitřní průměr rotorového svazku, D_h je průměr hřídele, N_z je počet a B_z je šířka žebry rotorové hvězdy. Odporový součinitel vstupu do rotorové hvězdy vychází z kinematiky proudění a je možné ho stanovit na základě poměru střední rychlosti proudění v axiálním směru a obvodové rychlosti rotujícího kanálu tvořeného rotorovou hvězdou podle vztahu

$$\xi_{rh} = 1 - (a \cdot S_{rh})^2 + \xi_{\mu} + b \cdot \left(\frac{u}{v_{ax}} \right)^2, \quad (3.4)$$

kde a , b a ξ_{μ} jsou parametry, které je nutné identifikovat pro variantu s šesti a osmi žebry rotorové hvězdy na základě porovnání s výsledky CFD simulací.

3.1.4 CFD modelování vstupu do rotorové hvězdy

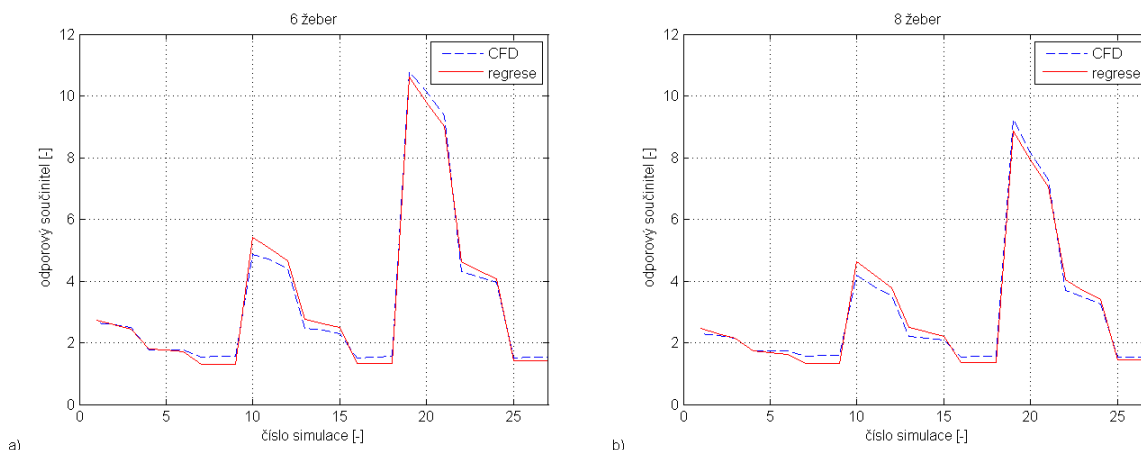
Vzhledem k symetrii rotorové hvězdy je možné modelovat pouze výseč zahrnující dvě poloviny axiálních kanálů a jedno žebro. Výpočtový model (obr. 3.3) odpovídá z hlediska geometrie skutečnému rotoru, který je tvořen kanálem, prostorem pod čelem vinutí nebo kruhu klece a odpovídajícím vstupním prostorem. Pro modelování byl využit systém CFX, který je již součástí simulačních nástrojů systému ANSYS/Workbench.



Obr. 3.3: CFD model vstupu do rotorové hvězdy

Aplikací algoritmu nelineární regrese byly stanoveny identifikované parametry a následně vztahy pro odporový součinitel vstupu rotorové hvězdy pro oba počty žebry. Shoda mezi odporovým součinitelem stanoveným pomocí CFD simulace a využitím

identifikovaného vztahu (3.4) je poměrně dobrá. V celém rozsahu 27 simulací pro oba počty žeber (obr. 3.4) je maximální rozdíl do 15%, což je možné považovat za plně dostačující.



Obr. 3.4: Odporový součinitel vstupu do rotorové hvězdy – a) porovnání CFD a regrese pro 6 žeber, b) porovnání CFD a regrese pro 8 žeber

3.1.5 Vzduchová mezera

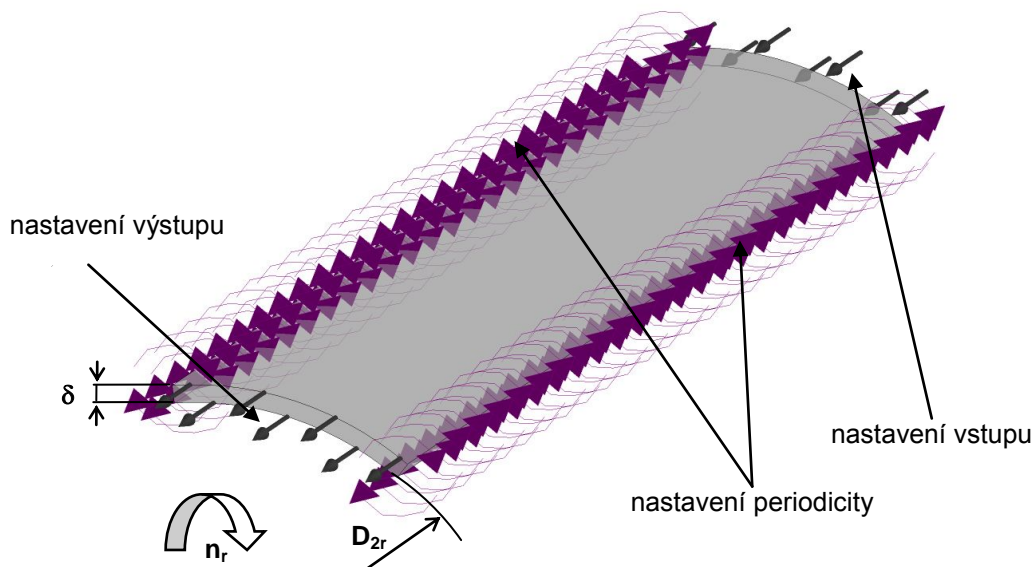
U elektrických strojů s výkonem přibližně nad 1MW se již značně projevuje vliv proudění ve vzduchové mezeře na tepelné poměry v jednotlivých částech stroje. Proudění ve vzduchové mezeře u těchto strojů je ovlivněno především ztrátou proudění vlivem tření. Z geometrického hlediska jde o proudění mezi dvěma válcovými plochami, pro které je možné odporový součinitel vystupující ve vztahu (3.1) vyjádřit po úpravách vztahem

$$\xi_{gap} = \lambda \cdot \frac{L_{fe} \cdot \left(1 + a \cdot \left(\frac{u_{2r}}{v_{ax}} \right)^b \right)}{2 \cdot \delta}, \quad (3.5)$$

kde δ je velikost vzduchové mezery, λ je součinitel tření, u_{2r} je obvodová rychlost vnějšího průměru rotoru, v_{ax} je axiální rychlost ve vzduchové mezeře a L_{fe} je délka svazku plechů rotoru a statoru. Konstanty a a b jsou závislé na charakteru proudění ve vzduchové mezeře. Tyto konstanty je možné opět stanovit na základě nelineární regrese výsledků CFD simulací.

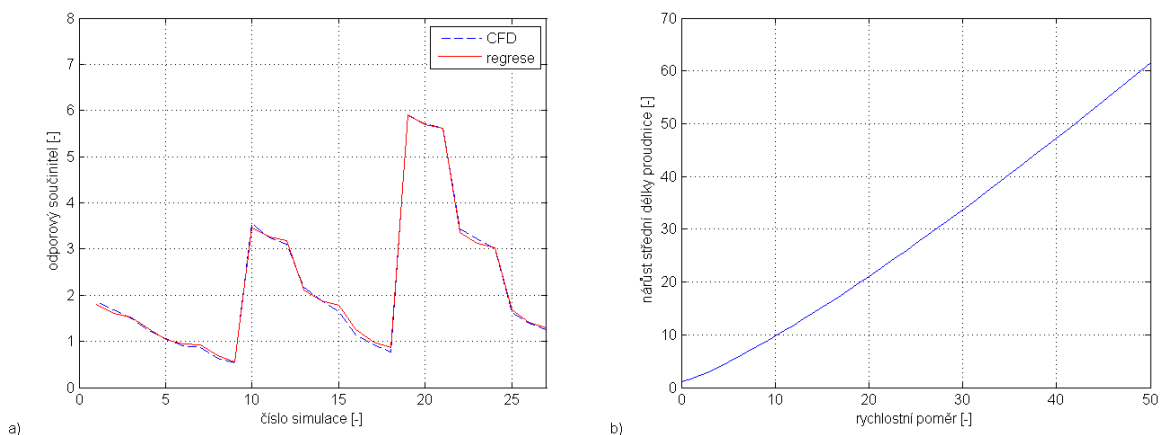
3.1.6 CFD modelování proudění ve vzduchové mezeře

Vzduchová mezera představuje v příčném průřezu k ose rotace z hlediska geometrie mezikruhovou výseč, proto je možné využít rotační symetrii. Výpočtový model je tvořen výsečí 45°, přičemž na plochy symetrie je nutné zadat podmínku rotační periodicity. Pro modelování byl využit systém CFX stejně jako u rotorové hvězdy.



Obr. 3.5: CFD model vzduchové mezery

Pomocí nelineární regrese byly identifikovány parametry a a b vystupující ve vztahu (3.5). Shoda mezi odporovým součinitelem stanoveným pomocí CFD simulace a využitím identifikovaného vztahu je poměrně dobrá. V celém rozsahu 27 simulací je maximální rozdíl (obr. 3.6a) do 10%, což je možné považovat za velmi dobrou shodu. Výhodou vztahu pro odporový součinitel tření ve vzduchové mezeře je vyjádření její závislosti na rychlostním poměru.



Obr. 3.6: Odporový součinitel vzduchové mezery – a) porovnání CFD a regrese, b) násobek nárůstu střední délky proudnice

Tento vztah je obecně aplikovatelný pouze s jedním omezením, kterým je rozsah křivosti daný poměrem vnitřního průměru statoru a vnějšího průměru rotoru. Vztah (3.5) je platný pro rozsah křivosti 1,029-1,115, což je ve většině případů elektrických strojů splněno.

4. Tepelné procesy v elektrických strojích

Elektrické stroje představují z hlediska popisu tepelných procesů v nich probíhajících složitou soustavu, ve které se tepelné ztráty vznikající v jednotlivých částech stroje odvádějí často složitými cestami. Příčinou vzniku tepelných ztrát je podstata funkce elektrického stroje, která spočívá v přeměně elektrické energie na mechanickou. Základním problémem při řešení chlazení elektrického stroje je volba vhodné metody popisující tepelné procesy, které probíhají v elektrickém stroji. Volba vhodné metody nejčastěji spočívá v hledání kompromisu mezi rychlostí a přesností výpočtu.

4.1 Metoda trojrozměrné tepelné sítě

Podrobnější rozbor této problematiky je uveden v plném textu habilitační práce. Dále tedy budou uvedeny pouze nejdůležitější závěry odvozené metody. Trojrozměrná síť popisující trojrozměrné vedení tepla v tělese vychází z nahrazení řešení parciální diferenciální rovnice, popisující vedení tepla v tělese třemi diferenciálními rovnicemi, popisujícími vedení tepla v jednotlivých směrech, avšak s respektováním vzájemného ovlivnění

$$\lambda_x \cdot V \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} = P_0 \cdot (1 + \varepsilon \cdot (\vartheta - \vartheta_o)) - q_{y1} - q_{y2} - q_{z1} - q_{z2} \dots \Rightarrow \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} - \chi_x^2 \cdot \vartheta = \theta_x \quad (4.1)$$

$$\lambda_y \cdot V \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} = P_0 \cdot (1 + \varepsilon \cdot (\vartheta - \vartheta_o)) - q_{x1} - q_{x2} - q_{z1} - q_{z2} \dots \Rightarrow \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} - \chi_y^2 \cdot \vartheta = \theta_y \quad (4.2)$$

$$\lambda_z \cdot V \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} = P_0 \cdot (1 + \varepsilon \cdot (\vartheta - \vartheta_o)) - q_{x1} - q_{x2} - q_{y1} - q_{y2} \dots \Rightarrow \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} - \chi_z^2 \cdot \vartheta = \theta_z, \quad (4.3)$$

kde q_{x1} , q_{y1} , q_{z1} , q_{x2} , q_{y2} , q_{z2} jsou tepelné toky v příčných směrech a ϑ_o je teplota okolí, ke které jsou vztaženy ztráty (za studena) P_0 [A1]. Tyto diferenciální rovnice lze dále upravit jak je patrné výše.

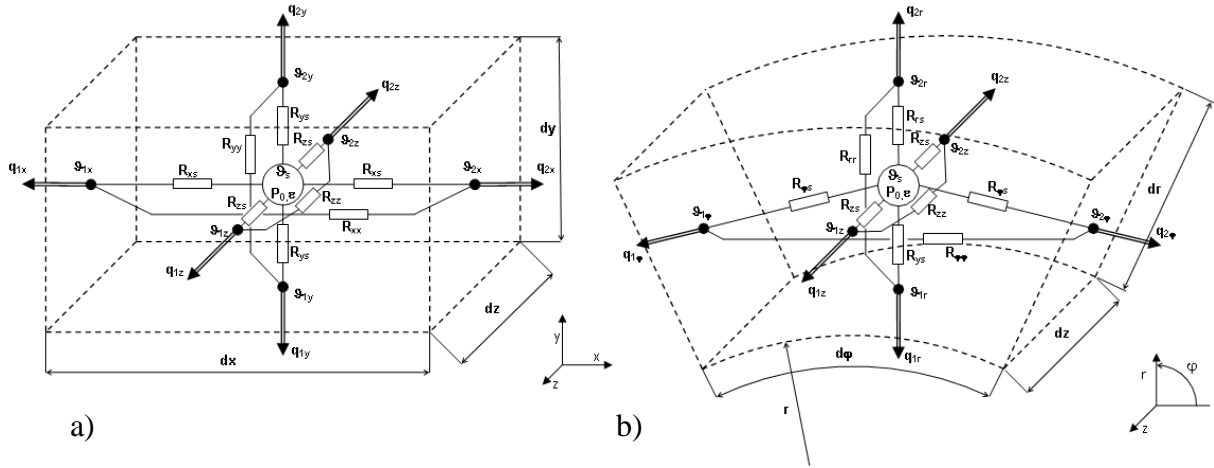
Podstata tohoto přístupu k řešení trojrozměrného vedení tepla bude popsána na případu hranolu (obr. 4.1a) chlazeného na všech stěnách a ztrátami generovanými v objemu, které jsou závislé na teplotě. Ze znalosti vztahu mezi tepelným tokem a teplotním spádem $\Delta \vartheta = R_g \cdot q$ [A1], lze stanovit tepelné toky v příčných směrech a tepelné odpory R_{vx} , R_{vy} a R_{vz} (viz. plný text habilitační práce) vystupující v jednotlivých diferenciálních rovnicích popisující trojrozměrné vedení tepla. Pak lze pro koeficienty χ_i vystupujících v upravených rovnicích (4.1), (4.2) a (4.3) odvodit následující vztahy

$$\chi_x^2 = \left(4 \cdot \frac{1}{R_{vy}} + 4 \cdot \frac{1}{R_{vz}} - \varepsilon \cdot P_0 \right) \cdot \frac{R_{vx}}{dx^2} \quad (4.4)$$

$$\chi_y^2 = \left(4 \cdot \frac{1}{R_{vx}} + 4 \cdot \frac{1}{R_{vz}} - \varepsilon \cdot P_0 \right) \cdot \frac{R_{vy}}{dy^2} \quad (4.5)$$

$$\chi_z^2 = \left(4 \cdot \frac{1}{R_{vx}} + 4 \cdot \frac{1}{R_{vy}} - \varepsilon \cdot P_0 \right) \cdot \frac{R_{vz}}{dz^2} \quad (4.6)$$

Na základě výše odvozených vztahů je možné hranol nahradit trojrozměrnou tepelnou sítí (obr. 4.1a) vycházející z jednorozměrné tepelné sítě hranolu. Po vyloučení středového uzlu známou transformací hvězda-trojúhelník je trojrozměrná tepelná síť hranolu tvořena sedmi uzly a devíti vodivostmi, která popisuje vedení tepla ve třech směrech s respektováním vzájemného ovlivnění jednotlivých tepelných toků.



Obr. 4.1: Trojrozměrné vedení tepla v a) hranolu b) mezikruží

Vztahy pro jednotlivé tepelné odpory jsou stanoveny obdobně, jak u jednorozměrného vedení, a mají následující tvar

$$R_{xs} = \frac{1}{\xi_{sx}} \cdot R_{vx}, \quad R_{ys} = \frac{1}{\xi_{sy}} \cdot R_{vy}, \quad R_{zs} = \frac{1}{\xi_{sz}} \cdot R_{vz}, \quad (4.7)$$

$$R_{xx} = \frac{1}{\xi_{xx}} \cdot R_{vx}, \quad R_{yy} = \frac{1}{\xi_{yy}} \cdot R_{vy}, \quad R_{zz} = \frac{1}{\xi_{zz}} \cdot R_{vz}, \quad (4.8)$$

kde ξ_{si} ξ_{ii} jsou součinitelé vnitřního tepelného odporu, které právě vyjadřují vzájemnou závislost tepelných toků v jednotlivých směrech. Z rozboru jednorozměrného vedení tepla vyplývá obdobná závislost součinitelů vnitřního odporu pro jednotlivé směry na parametru diferenciální rovnice χ^2

$$\frac{1}{\xi_{xs}} = \frac{1}{\chi_x \cdot dx} \cdot \left(\coth(\chi_x \cdot dx) + \frac{1}{\sinh(\chi_x \cdot dx)} - \frac{2}{\chi_x \cdot dx} \right) \quad (4.9)$$

$$\frac{1}{\xi_{xx}} = \frac{1}{\chi_x \cdot dx} \cdot \frac{\chi_x \cdot dx \cdot \sinh(\chi_x \cdot dx) - 2 \cdot (\cosh(\chi_x \cdot dx) - 1)}{\chi_x \cdot dx - \sinh(\chi_x \cdot dx)} \quad (4.10)$$

$$\frac{1}{\xi_{ys}} = \frac{1}{\chi_y \cdot dy} \cdot \left(\coth(\chi_y \cdot dy) + \frac{1}{\sinh(\chi_y \cdot dy)} - \frac{2}{\chi_y \cdot dy} \right) \quad (4.11)$$

$$\frac{1}{\xi_{yy}} = \frac{1}{\chi_y \cdot dy} \cdot \frac{\chi_y \cdot dy \cdot \sinh(\chi_y \cdot dy) - 2 \cdot (\cosh(\chi_y \cdot dy) - 1)}{\chi_y \cdot dy - \sinh(\chi_y \cdot dy)} \quad (3.12)$$

$$\frac{1}{\xi_{zs}} = \frac{1}{\chi_z \cdot dz} \cdot \left(\coth(\chi_z \cdot dz) + \frac{1}{\sinh(\chi_z \cdot dz)} - \frac{2}{\chi_z \cdot dz} \right) \quad (4.13)$$

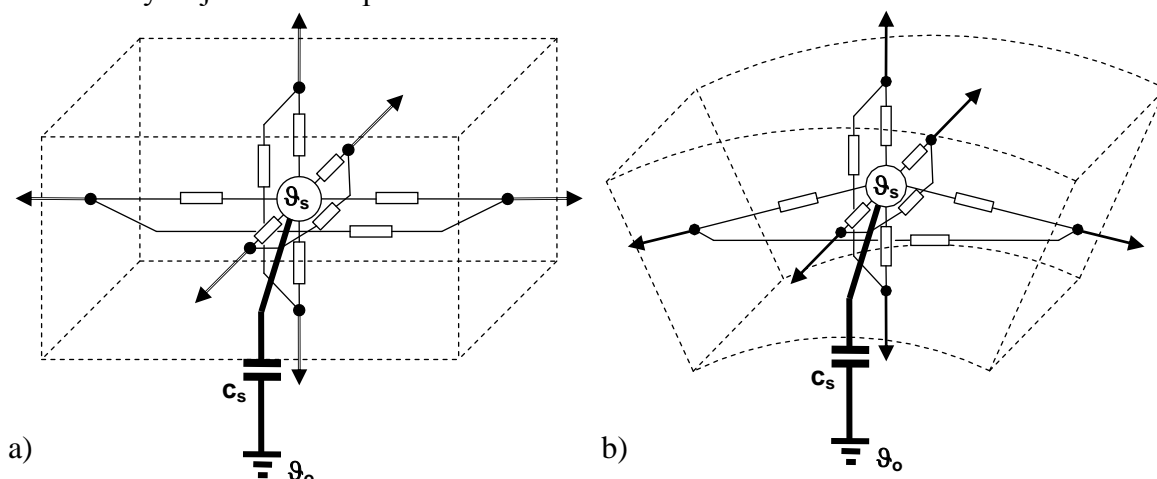
$$\frac{1}{\xi_{zz}} = \frac{1}{\chi_z \cdot dz} \cdot \frac{\chi_z \cdot dz \cdot \sinh(\chi_z \cdot dz) - 2 \cdot (\cosh(\chi_z \cdot dz) - 1)}{\chi_z \cdot dz - \sinh(\chi_z \cdot dz)}. \quad (4.14)$$

Je velmi důležité připomenout, že výše uvedené vztahy platí pouze pro případ, kdy parametr $\chi^2 > 0$. V tomto případě mohou součinitelé vnitřního odporu ξ_{ii} nabývat hodnot v rozmezí od $1/6$ do 0 a součinitelé vnitřního odporu ξ_{si} hodnot v rozmezí od $-1/2$ do -1 . V případě, kdy parametr diferenciální rovnice χ^2 je nulový, nabývají součinitelé vnitřního tepelného odporu limitní hodnoty $1/6$ respektive $-1/2$. Pro případ záporné hodnoty parametru χ^2 platí odvozené vztahy pouze s tím rozdílem, že se bere absolutní hodnota parametru χ . Tento případ se však v elektrických strojích prakticky nevyskytuje.

V elektrických strojích se kromě těles blížících se svou geometrií hranolu také velmi často vyskytují části, kde náhrada hranolem by byla dosti nepřesná a velmi zjednodušující. Jde v podstatě o části, které se svým geometrickým tvarem blíží spíše mezikruží. Mezi tyto části patří jho statorového a rotorového svazku, hřídel, štíty atd. Proto je třeba se zabývat náhradní tepelnou sítí výseče mezikruží (obr. 4.1b), zejména stanovením všech parametrů tepelné sítě. Struktura náhradní tepelné sítě je v podstatě stejná jako u hranolu. Náhradní tepelná síť je opět tvořena devíti tepelnými odpory a sedmi uzly. Rozdíl je pouze ve stanovení tepelných odporů, které vychází z řešení v polárních souřadnicích.

4.1.2 Transientní stav

Doposud byl řešen pomocí této metody pouze ustálený stav teplot (steady state). V současné době zejména u elektrických strojů používaných jako trakční stoje je stále silnější požadavek stanovit průběh teplot (přechodový stav) v průběhu zátěžného cyklu, který může být zcela náhodný nebo se opakující v pravidelných intervalech. Stejně tak se mohou během zátěžného cyklu měnit chladicí podmínky jako je teplota okolí, množství chladicího média apod. Změna teplot jednotlivých částí elektrického stroje závisí na tepelné časové konstantě a ta samozřejmě na tepelné kapacitě jednotlivých částí stroje respektive použitých materiálů. Velmi dobrým kompromisem mezi rychlostí a přesností výpočtu přechodového stavu je ve využití metody trojrozměrné teplotní sítě.



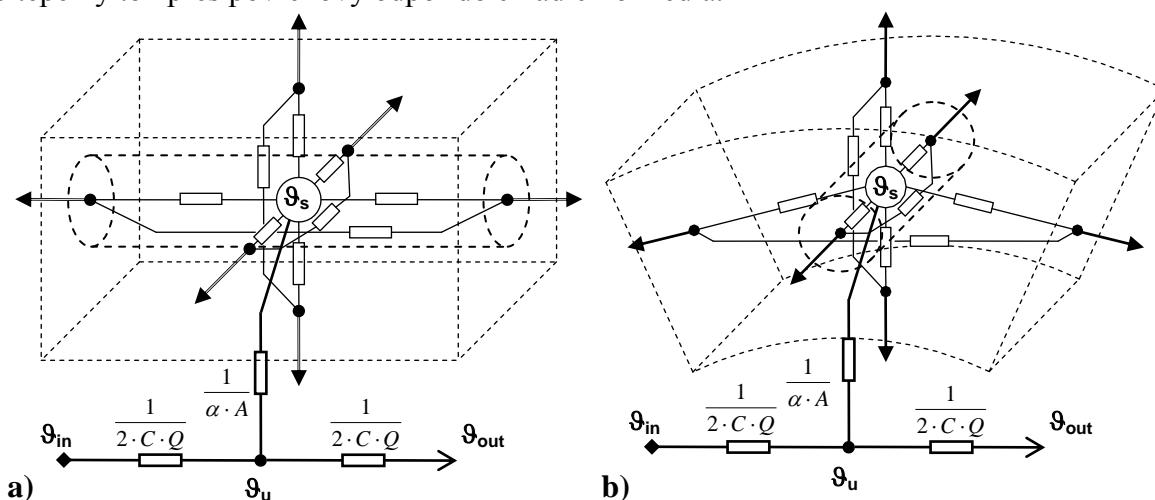
Obr. 4.2: Trojrozměrná náhradní síť pro řešení přechodového stavu – a) hranol b) mezikruží

Úprava trojrozměrné tepelné sítě, umožňující řešení přechodového stavu, spočívá v doplnění hodnoty tepelné kapacity do uzlu reprezentující střední teplotu tělesa (obr. 4.2). Tepelnou bilanci sestavenou pro jednotlivé uzly je možné sestavit soustavu diferenciálních rovnic, respektive soustavu šesti lineárních rovnic doplněnou o diferenciální rovnici prvního řádu pro uzel reprezentující střední teplotu tělesa (centrální uzel). Tepelná kapacita je soustředěna pouze v centrálním uzlu. Potom dynamika změny teplot v ostatních uzlech bude záviset pouze na dynamice změny teploty centrálního uzlu respektive na tepelné kapacitě tělesa. Řešením této soustavy rovnic jsou časové průběhy teplot v jednotlivých uzlech sítě.

4.1.3 Náhradní tepelná síť tělesa s chladicím kanálem

Trojrozměrná tepelná síť byla doposud řešena pouze pro tělesa, kdy teplo z tělesa bylo odváděno z povrchových uzlů. V elektrických strojích se však pro zvýšení účinnosti chlazení používají chladicí kanály, kterými proudí chladicí médium (vzduch, voda apod.). Jedná se zejména o axiální chladicí kanály ve statorovém nebo rotorovém svazku plechů, kostře nebo v jiné části elektrického stroje. Z tohoto důvodu je nezbytné trojrozměrnou náhradní síť rozšířit i na případ, kdy těleso (hranol nebo mezikruží) je chlazeno pomocí proudícího média

v kanále procházejícím vnitřkem tělesa (obr. 4.3). V takovém případě se otevírá další cesta pro tepelný tok přes povrchový odpor do chladícího média.



Obr. 4.3: Trojrozměrná tepelná síť s chladícím kanálem – a) hranol b) mezikružší

Při průchodu chladiva kanálem dochází k jeho postupnému ohřívání a tedy teplota chladiva se mezi vstupem a výstupem mění, přičemž závisí na teplotním profilu stěny kanálu (tělesa) podél jeho délky (souřadnice). Aby bylo možné co nejlépe vystihnout postupné oteplování chladiva, je povrchový odpor mezi tělesem a chladivem uvažován v centrálním uzlu reprezentujícím střední teplotu tělesa. Povrchový odpor je pak spojen s uzlem reprezentujícím oteplení chladiva, který může být součástí tepelné sítě s oběhem chladiva. Při řešení se vychází ze vztahů (4.1) až (4.3) pro hranol nebo pro mezikruhovou výseč doplněný (odečtený) o tepelný tok do chladícího média.

4.2 Tepelná síť toku chladiva

Tepelný výpočet je značně ovlivněn ventilací elektrického stroje. Při proudění chladícího média v elektrickém stroji dochází vlivem odebírání tepla z chlazených ploch k postupnému oteplování chladiva. To má za následek horší chlazení na straně výstupu, jelikož teplejší chladivo již není schopno odebírat teplo s takovou účinností, jak je tomu na straně vstupu i při zachování průtočných množství, respektive rychlosti proudění, na níž je závislý součinitel přestupu tepla. Z tohoto důvodu je vhodné v tepelném výpočtu hydraulickou síť charakterizovat tepelnou sítí toku chladiva, popisující oteplování chladiva při průchodu chladiva elektrickým strojem.

Při výpočtu tepelných procesů v elektrickém stroji se rozdělí hydraulická síť na jednotlivé úseky jako je průchod chladiva kanálem nebo kolem čel apod. Každému takovému úseku je pak přiřazen uzel (nora) charakterizovaný střední teplotou chladiva v jeho okolí.

Do těchto uzlů se pak přivádějí tepelné toky z příslušných částí stroje přes povrchové odpory. Chladící okruh je tak nahrazen určitou sítí uzlů (nor), které jsou mezi sebou tepelné vázány přes tepelné odpory chladiva. Jestliže se jedná o hydraulickou síť, která se různým způsobem rozvětňuje, a také naopak se jednotlivé toky mohou opět slučovat, je náhradní tepelná síť toku chladiva doplněna o uzly, které jsou totožné s uzly hydraulické sítě. Rovněž i do těchto uzlů je možné přivádět tepelné toky z chlazených částí elektrického stroje. Jedná se zejména o prostor štítu a tlakového zdroje. Navržený chladící okruh (hydraulickou sítí) tímto způsobem nahradíme tepelnou sítí chladiva, která je spojena přes povrchové odpory s tepelnou sítí popisující tepelné procesy v jednotlivých částech elektrického stroje. Při sestavování tepelné bilance jednotlivých uzlů celkové náhradní tepelné sítě je však zásadní rozdíl v případě uzlů

popisujících oteplování chladiva. Při sestavování tepelné bilance uzlů tvořících tepelnou síť toku chladiva je třeba respektovat směr proudění chladiva a tedy tepelný tok má směr proudění, což je proti teplotnímu spádu. Z tohoto důvodu nelze nahradit chladicí okruh pouze sítí tepelných odporů chladiva, ale je třeba respektovat směr proudění při vyjadřování tepelné bilance uzlu (nory).

Postup sestavování tepelné bilance je v plné verzi habilitační práce popsán na následujících konkrétních případech:

- tok chladiva s jedním uzlem
- jeden tok chladiva s více uzly
- rozvětvení a sloučení toku chladiva

Metoda sestavení tepelné bilance náhradní tepelné sítě toku chladiva a její vzájemné spojení s tepelnou sítí popisujících tepelný stav jednotlivých částí stroje je snadno algoritmicizovatelná a tím použitelná prakticky pro všechny typy uspořádání chladicích systémů elektrických strojů.

4.3 Komplexní tepelná síť elektrického stroje

V předchozích odstavcích byla rozebrána metoda popisu tepelných procesů v jednotlivých částech elektrického stroje a vliv oteplování toku chladiva na oteplení elektrického stroje včetně metody popisu pomocí tepelné sítě. Tepelná síť pro pevné části (solid) a tepelná síť toku chladiva (fluid) jsou vzájemně propojeny přes povrchové odpory, kdy přesnost jejich stanovení značně ovlivňuje přesnost celého výpočtu. Celková tepelná síť pak popisuje vzájemnou interakci mezi pevnými částmi, tokem chladiva a okolním prostředím. Jedná se v podstatě o jednoduchou verzi interakce solid-fluid, kterou využívá většina programových systémů založených na CFD modelování. Toky chladiva v jednotlivých částech elektrického stroje (tepelná síť toku chladiva) jsou poměrně jednoduše stanoveny z hydraulického výpočtu pomocí náhradní hydraulické sítě. Tím se pak ukazuje hlavní výhoda celkové tepelné sítě elektrického stroje, kdy je možné poměrně rychle posoudit vliv jednotlivých parametrů elektrického stroje z hlediska geometrického uspořádání, elektromagnetického návrhu, provozních podmínek atd. Matematický model popisující tuto komplexní tepelnou síť je možné převést do jednoduchého zápisu pomocí matic. Pro transientní stav je pak tepelná síť popsána následovně

$$C_i \frac{d\vartheta_i}{dt} + G \cdot \vartheta_i = z_i, \quad (4.15)$$

kde C_i je vektor tepelných kapacit středových uzlů (obr. 4.2), G je matice vodivostí a z_i je vektor tepelných toků. Matici vodivostí G je možné rozdělit na matici G_s popisující solid části elektrického stroje a to pomocí trojrozměrné náhradní tepelné sítě. Další část matice G je matice G_f popisující náhradní tepelnou síť toku chladiva (fluid). Zbývající část jsou matice G_p a G_{pQ} popisující vzájemnou interakci solid-fluid. Podle velikosti matic G_s a G_f je také rozdělen vektor tepelných toků na vektor z_s pro solid uzly a z_f pro fluid uzly.

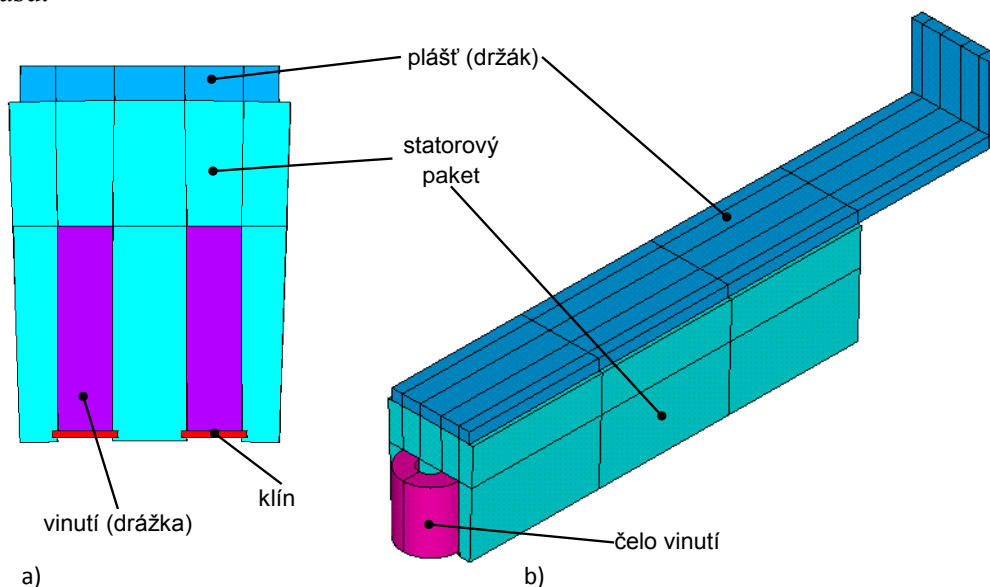
Výhodou tohoto způsobu popisu je možnost měnit v každém časovém kroku iteračního řešení okrajové podmínky, jako jsou tepelné ztráty, teplota okolí, průtočná množství apod. Takto lze pak simulovat různé provozní režimy elektrických strojů.

5. Ověření metody trojrozměrné tepelné sítě

Trojrozměrná tepelná síť (3DThNet) je pouze jednou z částí kompletní analýzy tepelných procesů probíhajících v elektrických strojích. Z tohoto důvodu bude tato část popisovat aplikace této metody společně s ventilační sítí a v neposlední řadě s tepelnou sítí toku chladiva na konkrétních typech elektrických strojů. Jednotlivé stroje byly vybrány s ohledem na jejich systém chlazení a také pro jejich nejčastější použití v praxi. Bude se tedy jednat o komplexní analýzu tepelného stavu elektrického stroje jak v ustáleném, tak i v přechodovém (transientním) stavu. Vzhledem k rozsáhlosti výpočtu a stanovení okrajových podmínek zde budou uvedeny jen stručné komentáře. Podrobnější informace jsou uvedeny v plné verzi habilitační práce.

5.1 Analýza tepelného stavu statoru synchronního motoru

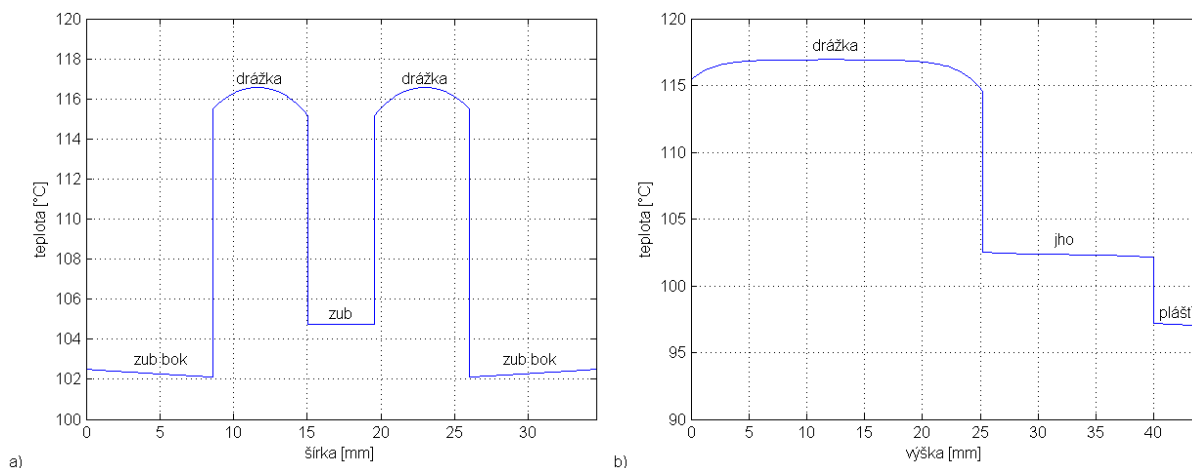
Synchronní motor, který je předmětem řešení, má z hlediska konstrukce klasické uspořádání. Jednoduchá konstrukce stroje se tak přímo nabízí k ověření výpočetních metod odvozených v habilitační práci. Kromě ustáleného stavu je vhodné porovnat i transientní stav, který dává představu o shodě mezi provedeným experimentem a výpočtovou simulací v průběhu času.



Obr. 5.1: Výpočtový model statoru synchronního motoru – a) rozdělení v příčném řezu na buňky, b) rozdělení na buňky v podélném směru

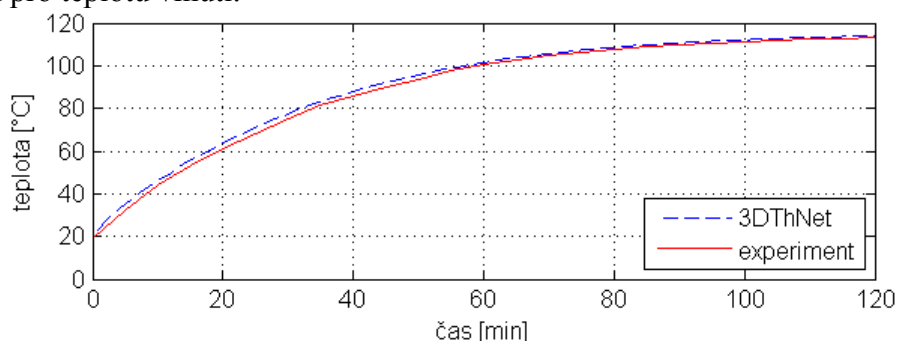
Pro ověření trojrozměrné tepelné sítě byl kromě provedeného experimentu vytvořen výpočtový model v systému ANSYS12, založený na metodě konečných prvků. Výpočtový model (obr. 5.1) je z hlediska geometrie, materiálových vlastností a okrajových podmínek identický s modelem vytvořeným metodou tepelné sítě, který byl popsán výše. Problémem, který nelze zadat do tepelného modelu vytvořeného v systému Ansys, je zadání tepelné závislosti ztrát ve vinutí. Vyřešení tohoto problému spočívá v iteračním řešení, kdy na základě vypočtených teplot vinutí jsou přepočítány tepelné ztráty ve vinutí a znovu proveden výpočet. Celý proces vyhodnocení teploty vinutí se opakuje až do splnění požadavku minimálního rozdílu mezi jednotlivými iteracemi.

Výsledkem výpočtu pomocí trojrozměrné tepelné sítě jsou střední teploty buněk a teploty na stěnách každé buňky. Potom pro vypočtené teploty na stěnách buňky je možné s využitím odvozených vztahů pro řešení diferenciálních rovnic (4.1) až (4.3) stanovit příslušné teplotní profily (obr. 5.2).



Obr. 5.2: Teplotní profil v příčném řezu a) po šířce segmentu statoru b) po výšce segmentu statoru

Transientní výpočet byl proveden pomocí 3DThNet pro okrajové podmínky, které byly totožné jako v případě experimentálního měření. Rozhodující byly ztráty ve vinutí, kdy jejich velikost odpovídá hodnotě, která je u skutečného stroje 3213 W na 192 drážek. Počáteční teplota a teplota okolí byla 19,3°C pro výpočet povrchových odporů. Čas simulace byl nastaven na dvě hodiny při časovém kroku dvě minuty, což se ukázalo jako plně postačující pro posouzení transientního chování. Výsledkem výpočtu jsou časové průběhy středních teplot jednotlivých buněk. Jako příklad je na obrázku 5.3 uvedeno porovnání výpočtu s měřením pro teplotu vinutí.



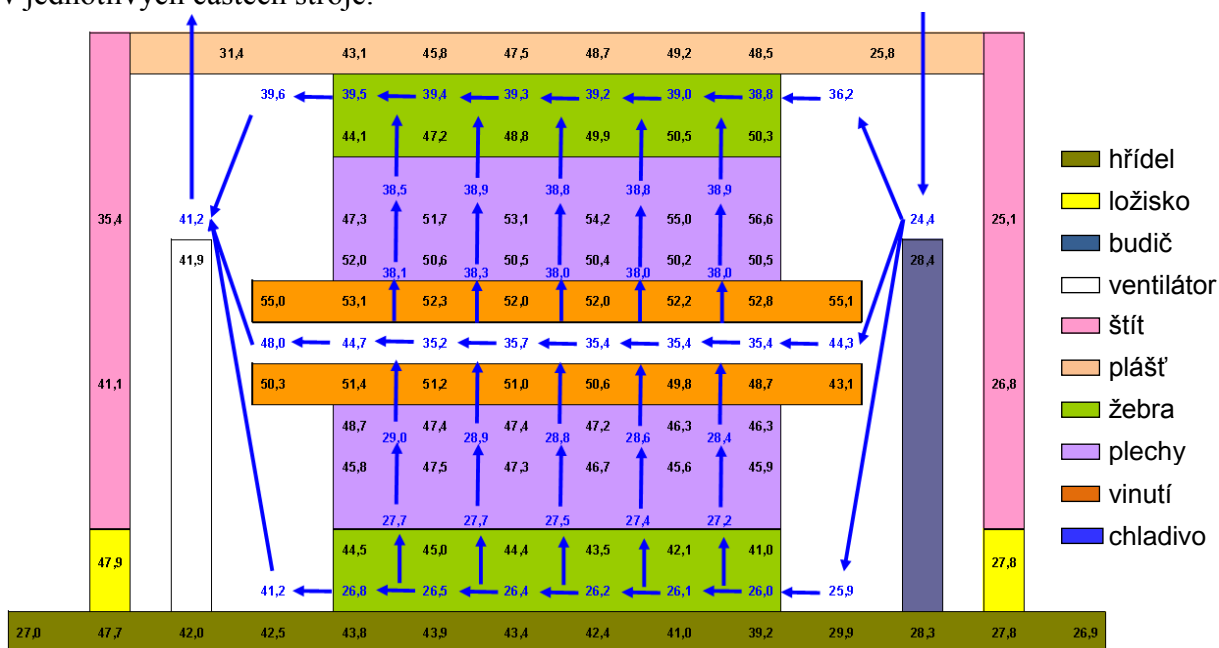
Obr. 5.3: Porovnání 3DThNet s měřením – vinutí

Porovnání průběhu teplot naměřených a vypočtených prokázalo vhodnost použití trojrozměrné tepelné sítě pro řešení jak ustáleného, tak i přechodového (transientního) stavu. Odchytky od měřeného průběhu jsou největší na počátku, ale v průběhu času se snižují. Maximální hodnoty odchytky se pohybují do 12,5%, většinou však podstatně níže. Největší odchytka je na začátku vinutí, avšak po deseti minutách již dosahuje pouze 5% a dále se již snižuje. Odchytka u zubu je rovněž největší na počátku a dosahuje maximální hodnoty 7,3%, dále se však snižuje až téměř k nulové hodnotě. Odchytka pro jho a plášť nepřekračuje v celém průběhu hranici 5%.

5.2 Elektrický stroj s radiálními ventilačními kanály – IP23 IC 01

Dalším strojem, na kterém byla použita trojrozměrná tepelná síť, je synchronní generátor používaný ve spojení s vodní turbínou pro výrobu elektrické energie. Vzhledem k nízkým otáčkám je pro chlazení statorového a rotorového vinutí nutné do konstrukce zahrnout radiální ventilační kanály, které se téměř vždy používají u těchto typů strojů.

Výpočtový model popisující tepelné procesy v elektrickém stroji je tvořen vzájemným propojením dvou výpočetních modelů, kterými jsou náhradní ventilační síť a trojrozměrná tepelná síť (solid) včetně tepelné sítě toku chladiva (fluid). Ventilační výpočet je nezbytné provést před tepelným výpočtem, jelikož na základě ventilačním výpočtem stanovených rychlostí proudění kolem chlazených ploch, jsou stanoveny součinitelé přestupu tepla, respektive povrchové tepelné odpory zajišťující vzájemné propojení „solid“ a „fluid“ tepelné sítě. Na obrázku 5.4 je zobrazeno rozložení teplot v jednotlivých uzlech tepelné sítě toku chladiva a teploty středních uzlů buněk, popisujících teploty jednotlivých částí generátoru. Postupné oteplování toku ukazují, jakým způsobem je teplo odebíráno z chlazených ploch v jednotlivých částech stroje.



Obr. 5.4: Rozložení teplot v tepelné síti

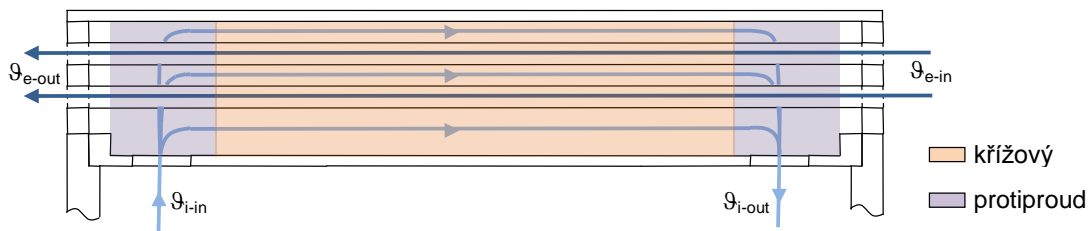
Na životnost vinutí má mimo jiné vliv rozložení teploty po jeho délce. Snahou návrhu chlazení je zajistit minimální a zároveň co nejvíce rovnoměrné tepelné zatížení po délce vinutí. Proto se svazek plechů rozděluje radiálními kanály. Počet radiálních kanálů je volen intuitivně nebo na základě zkušeností s podobnými stroji. S využitím výše popsané trojrozměrné tepelné a náhradní ventilační sítě je možné provést podrobnější analýzu tepelných procesů probíhajících ve stroji. Respektive se přímo nabízí pro využití optimalizačních algoritmů k zajištění optimálního chlazení elektrického stroje. Obecně používaným způsobem je rovnoměrné rozmístění radiálních kanálů po délce svazku. To však nepřináší rovnoměrné chlazení vinutí. Jedním důvodem je různé množství průtoku chladiva (vzduchu) jednotlivými radiálními kanály, jak ukazují výsledky simulací. Dalším důvodem je postupné oteplování vzduchu proudícího axiálně v rotorové hvězdě, čímž do každého následujícího radiálního kanálu vstupuje již teplejší vzduch a ten není schopen i při stejném průtoku (rychlostech) odebrat stejné množství tepla jako chladnější vzduch. Z těchto důvodů velmi často, zejména u dlouhých strojů s vyšším počtem radiálních kanálů, dochází k vyšším teplotám vinutí a svazku plechů směrem k výstupu chladiva ze stroje.

Pro tento stroj byla provedena optimalizace, čímž bylo docíleno podle předpokladu menšího snížení změn teplot rotorového a statorového vinutí po délce svazku. Přínos optimalizace rozmístění radiálních kanálů na minimalizaci změny teploty vinutí po délce bude výraznější u strojů s větším počtem radiálních kanálů. V dnešní době se vyrábí i stroje s počtem až kolem 25 radiálních kanálů. Popis optimalizace rozmístění radiálních kanálů a celého ventilačního systému včetně analýzy výsledků je uveden v plné verzi habilitační práce.

5.3 Elektrický stroj s radiálními ventilačními kanály – IP23 IC 01 51

Trojrozměrná tepelná síť, byla dále aplikována na řešení tepelných procesů probíhajících v asynchronním generátoru s výměníkem tepla. Pro větší bezpečnost před vniknutím okolních nečistot do vnitřku stroje, je tento stroj řešen s vnitřním (uzavřeným) a vnějším ventilačním systémem. Z hlediska systému chlazení jde o rozšíření předešlého řešeného synchronního generátoru, kde chladicí vzduch procházel strojem. V tomto případě chladicí vzduch (vnitřní okruh) neustále cirkuluje uvnitř stroje. Teplo naakumulované v chladivu průchodem stroje je předáno prostřednictvím trubkového výměníku (vzduch-vzduch) do vnějšího proudu chladiwa. Do stroje pak vstupuje ochlazený vzduch a celý proces se opakuje, přičemž teplota chladiwa (uzavřený okruh) vstupující do stroje nedosahuje teploty okolního vzduchu (vstupní teplota chladiwa vnějšího okruhu), pouze se jí blíží. Jak moc se přibližuje teplotě okolí, závisí na účinnosti výměníku tepla. Řešený asynchronní generátor má pro zintenzívnění chlazení čtrnáct radiálních ventilačních kanálů v rotoru i statoru.

Výpočtový model, popisující tepelné procesy v asynchronním stroji, vychází z modelu, který je popsán výše při řešení tepelných procesů v synchronním generátoru. Model je třeba rozšířit o tepelný výměník (obr. 5.5), s čímž jsou spojené modifikace ventilační a tepelné sítě. Výpočtový model výměníku je řešen jako samostatná část komplexního modelu. Vstupem do modelu výměníku je jednak tepelný tok výstupního (otepleného) vzduchu ze stroje a také tepelný tok vnějšího chladiwa o teplotě okolního vzduchu. Výstupem je pak tepelný tok, respektive teplota vnitřního chladiwa vstupujícího do stroje, a tepelný tok vnějšího chladiwa zvětšeného o množství tepla odebraného vnitřnímu chladiwu.

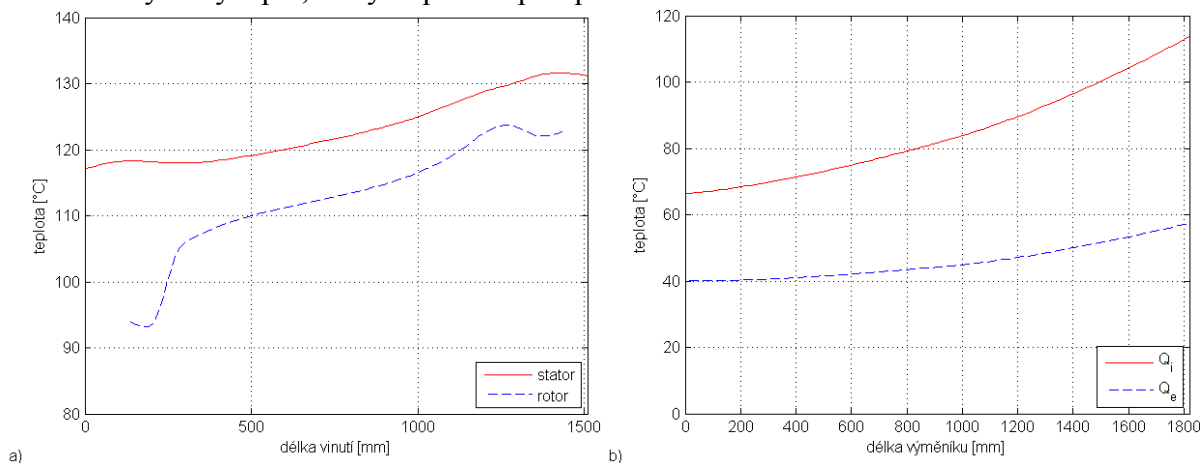


Obr. 5.5: Schéma trubkového výměníku tepla asynchronního generátoru

Tepelný výpočet celého stroje vede na iterační řešení. Důvodem je neznámá teplota chladiwa vystupujícího ze stroje, což je vstupní teplota chladiwa vstupujícího do výměníku. Celý výpočet výměníku předpokládá, že jsou známy vstupní teploty chladiw. Výstupní teplotu chladiwa vystupujícího ze stroje (oteplení vnitřního vzduchu) je možné stanovit tepelným výpočtem, ale ta je závislá na vstupní teplotě chladiwa, která je však výsledkem výpočtu tepelného výměníku. Tím se celý proces výpočtu komplikuje a vede na iterační řešení. Počet iterací a s tím související délka výpočtu je značně závislá na počátečním odhadu teploty vnitřního chladiwa vstupujícího do stroje. Na jejím základě je stanovena teplota vnitřního chladiwa vystupujícího ze stroje, která je vstupem pro výpočet tepelného stavu výměníku. Odhad této teploty je možné provést buď na základě zkušeností, nebo zcela náhodně, kdy je zřejmé že bude větší než vstupní teplota vnějšího chladiwa. V plném textu habilitační práce je popsán a ověřen postup odhadu této teploty založený na aritmetickém teplotním spádu ve výměníku. Tento přístup dává poměrně dobrou shodu mezi odhadnutou a vypočtenou teplotou, která se pohybuje kolem 6% a tím významně přispívá ke snížení počtu iterací.

Z hlediska základního zhodnocení výsledků tepelného výpočtu jsou podstatné střední teploty jednotlivých částí elektrického stroje. Nejdůležitější z hlediska spolehlivosti jsou teploty vinutí statoru a rotoru. Metoda trojrozměrné tepelné sítě umožňuje snadno stanovit průběh teploty po délce vinutí (obr. 5.6a) a to řešením diferenciálních rovnic teplotního profilu přes každou buňku představující vinutí statoru nebo rotoru. Z výsledků je zřejmý vliv postupného oteplování chladiwa vnitřního okruhu, procházejícího jednotlivými radiálními

kanály, zejména je to pak patrné u rotoru. U tohoto typu stroje je také podstatný vliv účinnosti tepelného výměníku, která je závislá zejména na velikosti teplosměnné plochy, ale také na rychlostních poměrech obou chladiv. Návrh výměníku je pak otázkou určitého kompromisu mezi velikostí (hmotností) a intenzitou výměny tepla mezi oběma chladivy. Průběh teplot po délce trubek výměníku (obr. 5.6b) ukazuje na převládající protiproudý charakter výměny tepla, který odpovídá předpokladu.



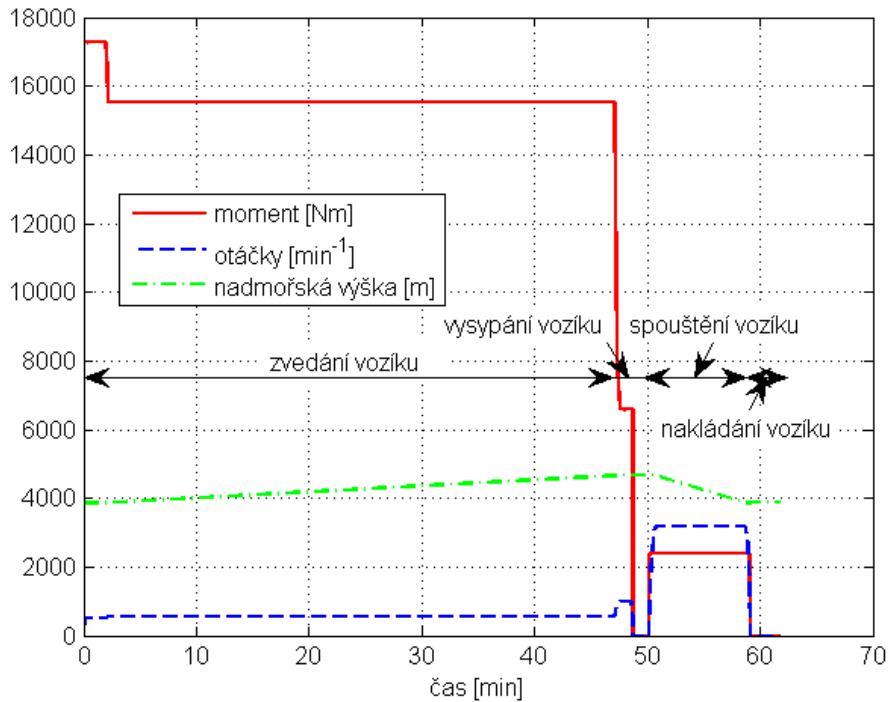
Obr. 5.6: Vybrané výsledky tepelného výpočtu a) průběh teploty po délce vinutí b) průběh teploty vnitřního a vnějšího chladiva po délce výměníku

Výpočtový model vykazuje velmi dobrou shodu s naměřenými teplotami. Odchylka mezi měřeními a výpočtem se pohybuje do 8%. Největší odchylka je v případě kroužků, kdy stanovení odvodu tepla z povrchu kroužků je velmi komplikované. Nejlepší shody bylo dosaženo u teploty vzduchu vystupujícího ze stroje.

5.4 Trakční stroj s vnějším zdrojem ventilace – IP23 IC 37

Předešlé dva případy elektrických strojů byly řešeny pro ustálené stavy tepelných procesů. V současné době je však kladen požadavek na posouzení tepelných procesů v průběhu času v závislosti na měnících se okolních podmínkách a zatížení stroje. Jde především o stroje používané v trakci. Jedním z elektrických strojů používaných v trakci je asynchronní motor, který je používán v důlním průmyslu pro pohon vozíku s měděnou rudou. Tento stroj je navržen jako součást nákladního automobilu, který má centrální zdroj ventilace, používaný mimo tento stroj i k chlazení měniče, spalovacího motoru a dalších částí automobilu. Jedná se tedy o asynchronní motor s vnějším zdrojem ventilace, zajišťujícím podle pracovního režimu odpovídající průtočné množství chladiva, v tomto případě vzduchu. Cílem bylo posoudit vliv zátěžného cyklu na tepelné procesy probíhající ve stroji. Zátěžný cyklus (obr. 5.7) je tvořen čtyřmi fázemi, které se neustále opakují po dobu provozu nákladního automobilu. Celou situaci komplikuje poměrně vysoká nadmořská výška přes 4000 m, která se v průběhu zátěžného cyklu také mění. S nadmořskou výškou se mění termofyzikální vlastnosti chladícího vzduchu a tím i schopnost odvádět teplo z chlazených ploch (součinitel přestupu tepla).

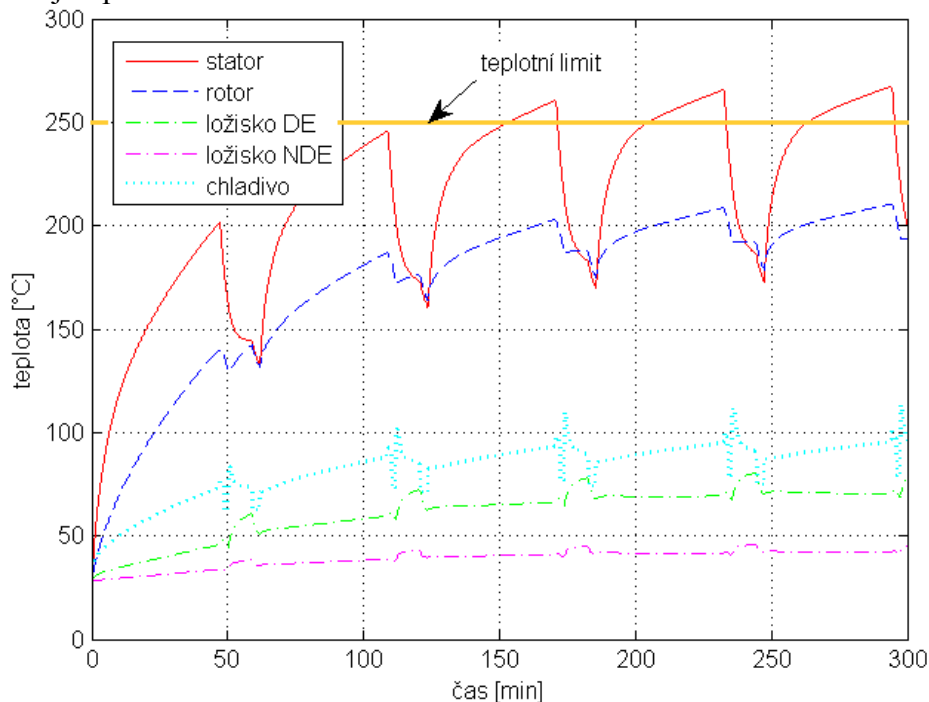
Při výpočtovém modelování byla nejdříve vytvořena náhradní ventilační síť pro posouzení rozdělení známého celkového průtoku vzduchu vstupujícího do stroje na rotorovou a statorovou část. Náhradní ventilační síť je tvořena dvěma paralelními větvemi popisujícími proudění v axiálních kanálech statoru a rotoru. Komplexní tepelná síť asynchronního motoru byla sestavena obdobně jako u předešlých strojů. Tepelná síť toku chladiva (fluid) odpovídá ventilační síti, jenom jsou navíc uvažovány ve statorové a rotorové větvi dva uzly, do kterých je odváděno teplo z povrchu axiálních kanálů ve jhu. Cílem je lépe postihnout postupné oteplování vzduchu proudícího v axiálních kanálech.



Obr. 5.7: Zátěží cyklus asynchronního motoru

Před výpočtem tepelných procesů v asynchronním stroji v průběhu zátěžného cyklu (přechodový stav) bylo provedeno sladění výpočtu (ustálený stav) s výsledky typové zkoušky včetně ventilačního měření.

Výsledkem výpočtu jsou časové průběhy teplot jednotlivých uzlů komplexní tepelné sítě. Teplota okolního vzduchu byla 28°C, zatímco chladicí vzduch byl přehřát průchodem přes měnič na 42°C. Asynchronní motor nepracuje pouze jeden zátěžný cyklus, ale po dobu několika cyklů. Proto byla provedena simulace pěti zátěžných cyklů (obr. 5.8) na sebe navazujících. Výsledky ukazují, že v průběhu třetího cyklu je překročena teplota 250°C, která je limitující pro izolaci statorového vinutí.



Obr. 5.8: Průběh teplot vybraných částí trakčního motoru během pracovní doby motoru

6. Oteplovací zkouška

Součástí typové zkoušky je, vedle stanovení energetické bilance a případně ventilačního měření, oteplovací zkouška. Cílem oteplovací zkoušky je ověření, zda-li jednotlivé části elektrického stroje při daném zatížení nepřekročí dovolené hodnoty dané třídou izolace. Stroj je třeba zatěžovat do ustálení. V současné době se vyrábějí čím dál větší stroje, jejich časové konstanty jsou několik hodin, někdy i desítky hodin. Zkrácení doby oteplovací zkoušky by bylo obrovským přínosem a to především finančním. Ve skutečnosti jsou však elektrické stroje chlazeny kromě vedením a nucenou konvekcí, také přirozenou konvekcí a radiací (sáláním), čímž se situace podstatně komplikuje. V případě všech způsobů přenosu tepla je možné (měřenou) teplotu popsat diferenciální rovnicí

$$c \cdot \frac{d\vartheta}{dt} + G \cdot (\vartheta - \vartheta_0) + K \cdot (\vartheta - \vartheta_0)^{1,25} + R \cdot ((\vartheta + 273)^4 - (\vartheta_0 + 273)^4) = P_0, \quad (6.1)$$

kde c je tepelná kapacita, ϑ_0 je počáteční teplota, P_0 jsou počáteční ztráty, G je vodivost vedením, K je součinitel konvekce závislý na tvaru a velikosti chlazené plochy a R je součinitel radiace (sálání) závislý především na emisivitě a velikosti chlazeného povrchu.

Pro identifikaci parametrů diferenciální rovnice (6.1) je možné použít metodu nejmenších čtverců, kde minimalizovaná funkce je ve tvaru

$$f = (\vartheta_i^m - F(P_0, G, K, R, c))^2, \quad (6.2)$$

přičemž F je funkce vyjadřující teplotu stanovenou numerickým řešením diferenciální rovnice (6.1) a ϑ_i^m jsou naměřené teploty v jednotlivých časových intervalech.

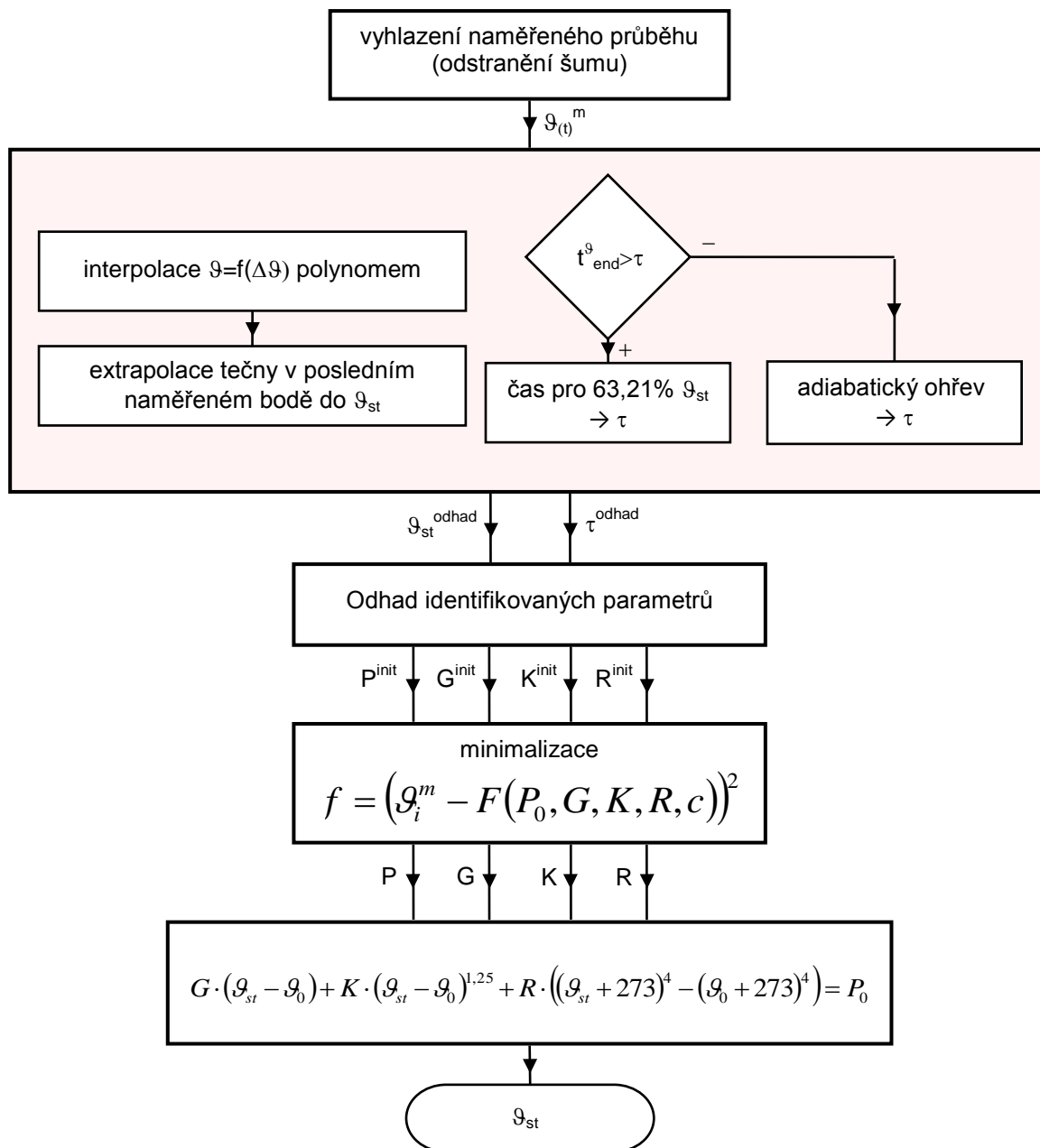
Konvergence řešení minimalizace funkce (6.2) je značně závislá na počátečních odhadech parametrů vystupujících ve vztahu (6.1). Úspěch správné extrapolace naměřené teploty je tak nejvíce citlivý právě na stanovení počátečních odhadů, které by měly být co neblíže skutečnému řešení (alespoň řádově). Metoda stanovení počátečních odhadů vychází z předpokladu rovnocenného odvodu tepla vedením, konvekcí a radiací. V plné verzi habilitační práce je podrobněji popsána metoda stanovení počátečních odhadů výše zmíněných parametrů diferenciální rovnice (6.1). Celý algoritmus extrapolace naměřených dat oteplování je možné stručně shrnout do jednotlivých kroků v obrázku 6.1.

Při oteplovací zkoušce elektrického stroje je někdy potřeba analyzovat kromě oteplovací křivky i křivku ochlazovací. Jedná se zejména o měření teploty rotoru, kdy je snímač teploty umístěný na rotoru (vinutí, plech, čelo atd.) připojen k měřicímu přístroji až po ukončení zkoušky respektive zastavení rotace. Velmi často se používá tato metoda ke stanovení střední teploty vinutí rotoru odporovou metodou, kdy není možné za provozu měřit změnu odporu s teplotou. Velmi důležité je co nejrychleji zastavit stroj po vypnutí, přesně zaznamenat čas a u strojů s cizím chlazením zastavit chlazení v okamžiku vypnutí stroje. Teplotu v okamžiku vypnutí, respektive na konci zkoušky, je pak nutné stanovit extrapolací ochlazovací křivky do okamžiku vypnutí. To vede na obdobný problém jako u oteplovací křivky. Tento problém se komplikuje tím, že je známa ustálená teplota ϑ_∞ (teplota okolí), ale není známa počáteční teplota ϑ_p (teplota v okamžiku vypnutí).

V případě uvažování chlazení všemi třemi způsoby přenosu tepla a za předpokladu, že ztráty jsou ve vypnutém stroji nulové, diferenciální rovnice (6.1) se zjednoduší na tvar popisující ochlazovací křivku

$$c \cdot \frac{d\vartheta}{dt} + G \cdot (\vartheta - \vartheta_0) + K \cdot (\vartheta - \vartheta_0)^{1,25} + R \cdot ((\vartheta + 273)^4 - (\vartheta_0 + 273)^4) = 0, \quad (6.3)$$

čímž se sníží o jeden počet identifikovaných parametrů. Celý postup identifikace parametrů diferenciální rovnice je pak stejný jako v případě oteplovací křivky. Pouze po identifikaci je potřeba provést extrapolaci do počátečního času (vypnutí stroje).



Obr. 6.1: Vývojový diagram extrapolčního algoritmu – oteplovací křivka

Hlavní výhodou vytvořeného algoritmu extrapolace ustálené (počáteční) teploty oteplovací (ochlazovací) křivky je stanovení počátečních odhadů identifikovaných parametrů, které mají značný vliv na úspěšnost identifikace a její stabilitu i pro naměřené průběhy odpovídající jeden a půl násobku časové konstanty. Výše popsany algoritmus extrapolace vychází z fyzikálního základu předpokládaného průběhu teploty, se kterým je možné se setkat u elektrických strojů. Počáteční odhady jsou stanoveny s řádovou přesností oproti ostatním metodám, které používají obecnější funkce. Celý algoritmus nevyžaduje žádný zásah ze strany uživatele a veškeré kroky jsou realizovány automaticky na základě jasně daných pravidel.

7. Závěr

Tato práce se zabývá rozbořem současných trendů v oblasti modelování a simulace tepelných procesů v elektrických strojích. Hlavní důraz je kladen na možnost začlenění nových výpočtových metod do komplexního návrhu elektrického stroje při zachování velmi dobré přesnosti. Neobvyklá metoda náhradní tepelné sítě je založena na analytickém řešení a bere v úvahu i trojrozměrné vedení tepla v modelovaných částech elektrického stroje. V práci je popsáno sestavení matematického modelu trojrozměrné tepelné sítě vzájemně propojené s libovolně větvenou tepelnou sítí toku chladiva. Nově vyvinutá metoda trojrozměrné tepelné sítě byla aplikována na reálných strojích a ověřena porovnáním s výsledky oteplovacích zkoušek.

7.1 Aktuálnost řešené problematiky

Problematika modelování tepelných procesů v elektrických strojích je stále velmi aktuální. Vědecký význam lze ukázat na celé řadě publikací, které se zabývají modelováním tepelných procesů v elektrických strojích. V několika málo publikacích je snaha o rozvinutí a vývoj nových metod používaných pro modelování tepelných procesů probíhajících v elektrických strojích. Rovněž je v řadě publikací využito CFD modelování, nikoliv však celého stroje, ale pouze jeho určitých významných částí.

Z mnoha diskusí s odborníky a zástupci tuzemských i zahraničních firem, zabývajících se výrobou elektrických strojů, vyplynul i velký praktický význam. Zejména jde o požadavek na rychlou a dostatečně přesnou tepelnou kontrolu navrhovaného elektrického stroje již v průběhu elektro-magnetického a na něj navazujícího mechanického návrhu. V podstatě jde o požadavek na komplexnost celého návrhu elektrického stroje, vyznačující se rychlostí a přesností. Získání nových znalostí v této oblasti by mělo příznivý vliv na řadu firem, zejména tuzemských, zabývajících se výrobou elektrických strojů.

Aktuálnost potvrzují i publikace autora [A1-A17], který se touto problematikou zabývá již od roku 1998, kdy navázal na výzkum prováděný v této oblasti ve Výzkumném ústavu elektrických strojů v Brně, který byl v devadesátých letech prakticky ukončen. Významnou inspirací byla pro autora zahraniční stáž na technické univerzitě v Nottinghamu u Dr. S. Pickeringa (Department of Mechanical, Materials and Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, University of Nottingham, UK).

7.2 Shrnutí obsahu práce

S využitím dostupné literatury a výsledků vlastního výzkumu autora byla formulována neobvyklá trojrozměrná tepelná síť, která je obecně aplikovatelná na jakýkoliv elektrický stroj nebo jiné zařízení. Trojrozměrná tepelná síť byla dále využita jako součást komplexní tepelné sítě, u které je respektován vliv toku chladiva, respektive jeho postupné oteplování vlivem proudění kolem chlazených ploch. Komplexní tepelná síť se vyznačuje následujícími vlastnostmi:

- Trojrozměrná tepelná síť je aplikovatelná na geometrické těleso tvaru hranol a mezikruhovou výseč (pro elektrický stroj plně dostačující). Na stěny tělesa je možné aplikovat sdílení tepla přirozenou i nucenou konvekcí a radiací (sáláním). Dále byla odvozena trojrozměrná tepelná síť hranolu i mezikruží s vnitřním chladícím kanálem. Pro řešení přechodových stavů (transientních úloh, zátěžných cyklů) byla trojrozměrná tepelná síť hranolu a mezikruží rozšířena o tepelnou kapacitu.
- Tepelná síť (bilance) toku chladiva byla formulována pro obecně větvenou hydraulickou síť respektující střední oteplení toku chladiva při průchodu kolem odpovídající chlazené části elektrického stroje. Matematický model tepelné sítě toku

chladiiva byl sestaven v maticové podobě, stejně jako je tomu u trojrozměrné tepelné sítě, čímž je celý model snadno sestavitelný.

- Algoritmus sestavování matematického modelu komplexní tepelné sítě je založen na maticovém zápisu. Celková matice tepelných vodivostí je snadno sestavitelná pomocí submatic, popisujících „solid“ a „fluid“ části a submatic, popisujících jejich vzájemné interakce respektující směr toku chladiiva. Obdobně je tomu u vektoru tepelných toků, který je pro přehlednost i zde rozdělen na prvky představující „solid“ a „fluid“ části.

Kapitola 3 je věnována některým významným aspektům z hlediska ventilačních systémů elektrických strojů, zejména byl rozebrán vliv otáček na hydraulické odpory, které mají zásadní vliv na přesnost celého ventilačního (hydraulického) výpočtu. Pro řešení této části bylo využito CFD modelování založené na metodě konečných prvků nebo objemů. S ohledem na pozdější využití výsledků CFD modelování v další části této práce, byly především řešeny tyto dílčí problémy ventilace elektrických strojů: vliv rotace na proudění v axiálních kanálech rotoru, vliv rotace na vstup do rotorové hvězdy a proudění ve vzduchové mezeře.

V kapitole 5 je vyvinutá metoda trojrozměrné tepelné sítě aplikovaná na reálné elektrické stroje. Vlastní výběr jednotlivých strojů byl volen tak, aby zahrnul co nejširší spektrum elektrických strojů. Rovněž byl při výběru testovaných elektrických strojů brán v úvahu fakt, že běžné výpočetní metody nejsou dostatečně detailní (jednorozměrná tepelná síť) nebo jsou prakticky nepoužitelné (CFD). Trojrozměrná tepelná síť byla ověřena na následujících elektrických strojích:

- Pro ověření trojrozměrné tepelné sítě s uvažováním pasivního chlazení (přirozené konvekce a sálání) byla provedena analýza tepelného stavu statoru synchronního motoru. Výsledky výpočtu byly porovnány s výpočtem pomocí metody konečných prvků.
- Dalším strojem, kde má podstatný význam použití trojrozměrné tepelné sítě, byl elektrický stroj s radiálními ventilačními kanály (IP23 IC 01). Na tomto stroji byla, kromě základního tepelného výpočtu, provedena optimalizace rozmístění radiálních kanálů po délce svazku. Pro optimalizaci osmi parametrů tepelného modelu bylo využito genetického algoritmu. Optimalizací byly identifikovány délky paketů plechů mezi jednotlivými radiálními kanály a míra uzavření vstupu do statoru a výstupu z rotorové hvězdy, které zajišťují nejrovnoměrnější chlazení vinutí statoru a rotoru.
- V současné době se velmi často navrhuje stroje do speciálních prostředí a tím pádem je nutné použít uzavřený stroj s vnitřním a vnějším ventilačním systémem, respektive s výměníkem tepla. Proto byl řešen elektrický stroj s radiálními ventilačními kanály a s trubkovým výměníkem tepla vzduch-vzduch (IP23 IC 01 51). Trojrozměrná tepelná síť, respektive komplexní tepelná síť, byla doplněna o část popisující přenos tepla ve výměníku.
- Posledním strojem, na kterém byla ověřena trojrozměrná tepelná síť, byl trakční asynchronní motor s vnějším zdrojem ventilace (IP23 IC 37). Výpočtové modelování na tomto stroji bylo zaměřeno na simulaci zátěžného cyklu, a proto byla komplexní tepelná síť doplněna o tepelné kapacity a časové závislosti ztrát.

Výsledky výpočtových simulací všech testovaných strojů byly porovnány s výsledky typových zkoušek, zejména však oteplovacími zkouškami. Na většině těchto strojů byla navíc provedena ventilační měření.

Poslední kapitola je zaměřena na vyhodnocení průběhu teploty měřené během oteplovací zkoušky. V této části práce je popsán algoritmus predikce ustálené (počáteční) teploty z poměrně malé části naměřeného průběhu oteplovací (ochlazovací) křivky.

7.3 Přínos práce

Přínos této habilitační práce je možné pro lepší přehlednost shrnout do několika následujících bodů:

- Relativně nový přístup stanovení ztrátových součinitelů používaných při stanovení hydraulických odporů, respektive při výpočtu hydraulických (ventilačních) sítí. Tento přístup využívá nejmodernějších výpočetních metod v oblasti modelování proudění, založených na metodě konečných objemů (CFD). Doposud používaným přístupem bylo experimentální stanovení a následné empirické vyjádření vztahů pro ztrátové součinitele. Na základě využití CFD modelování a plánu simulací je tak možné stanovit obecně platné vztahy pro ztrátové součinitele v závislosti na různých parametrech jako je geometrie, otáčky apod. Zvláště vliv otáček je ve většině doposud známých vztahů zanedbán nebo jen odhadnut na základě zkušeností. Podrobnosti a popis tohoto přístupu je uveden v kapitole 3.
- Byla vyvinuta neobvyklá metoda náhradní tepelné sítě (3DThNet), která kombinuje výhody analytického řešení a metody konečných prvků. Oproti běžně používaným tepelným sítím, které jsou založeny na předpokladu jednorozměrného vedení tepla, nová metoda respektuje trojrozměrné vedení tepla v tělesech a blíží se tak analytickému řešení. V porovnání s metodou konečných prvků však nevyžaduje velké množství uzlů a s tím spojenou výpočetní náročnost. Podstatnou vlastností trojrozměrné tepelné sítě je možnost výpočtu tepelného průběhu v modelovaném tělese ve všech směrech souřadného systému a to pouze s využitím výpočtem stanovených teplot v uzlech a vstupních podmínkách již použitých ve výpočtu. Další velkou výhodou této metody tepelné sítě je možnost řešení jak ustálených tak i přechodových stavů. Rovněž byl odvozen algoritmus sestavení tepelné bilance (náhradní tepelné sítě) obecně větveného toku chladiwa a její snadné propojení s trojrozměrnou tepelnou sítí popisující vedení tepla v pevných částech. Podrobnosti a odvození této metody je uvedeno v kapitole 4.
- Možnost modelování tepelných procesů pomocí trojrozměrné tepelné sítě byla ověřena na čtyřech strojích. Výsledky výpočtu byly porovnány s měřením. Odchytky mezi výpočtem a měřením potvrzují velmi dobrou přesnost a vhodnost použití této metody. V jednom případě pasivního (nelineárního) chlazení byly výsledky výpočtu pomocí 3DThNet porovnány s výpočtovou simulací modelu vytvořeného metodou konečných prvků. Z porovnání s měřením vykazovala metoda 3DThNet lepší výsledky než metoda konečných prvků. Přínosem je také možnost modelovat elektrické stroje s radiálními kanály, kdy je možné posoudit vliv jednotlivých kanálů na chlazení zejména vinutí stroje. Doposud používané metody nahrazují všechny radiální kanály pouze jedním ekvivalentním, což vnáší do výpočtu určitou nepřesnost a tím snižuje vypovídací schopnost celého výpočtu. Nespornou výhodou trojrozměrné tepelné sítě je její využití do optimalizačních nebo identifikačních algoritmů a možnost snadného začlenění dalších výpočetních modelů, jako byl případ tepelného výměníku. Další výhodou je velmi snadné řešení převodových stavů, jako jsou zátěžné cykly. Řešení se vyznačuje velkou rychlostí výpočtu při zachování dostatečné přesnosti. Podrobnosti o aplikaci trojrozměrné tepelné sítě jsou uvedeny v kapitole 5.
- Nový přístup predikce ustálené (počáteční) teploty z průběhu oteplovací (ochlazovací) křivky. Sestavený algoritmus je založen na fyzikálním základu sdílení tepla v elektrických strojích, který je možné popsat nelineární diferenciální rovnicí. Zvláště významná je metoda stanovení počátečních odhadů parametrů diferenciální rovnice, které značně ovlivňují konvergenci algoritmu predikce. Podrobnosti a popis tohoto algoritmu je uveden v kapitole 6.

- Praktický přínos pro modelování tepelných procesů probíhajících v elektrických strojích. Výpočtový tepelný model sestavený podle postupu popsaného v této práci je snadno aplikovatelný do jakéhokoliv kroku celkového návrhu elektrického stroje. Vlastní výpočtová simulace pak dává rychlou a dostatečně detailní představu o tepelném chování elektrického stroje při zachování velmi dobré přesnosti.

7.4 *Náměty a možnosti dalšího využití*

V této práci je ukázána jedna z možných cest modelování tepelných procesů probíhajících v elektrických strojích případně i jiných zařízení.

Popsaná metoda výpočtového modelování nemusí být použita pouze pro tepelnou kontrolu elektrických strojů, ale i predikci oteplení v reálném čase. Kromě toho výpočtový model může být i součástí programu řídicí nebo diagnostické jednotky (daná metoda je snadno programovatelná) tvořící součást elektrického stroje, čímž by bylo možné s dostatečnou časovou rezervou předcházet stavům, které jsou nežádoucí z hlediska provozní spolehlivosti.

Další možností je využití této metody do sdružené analýzy mezi elektro-magnetickým a tepelným výpočtem, jelikož jednotlivé výpočty se vzájemně ovlivňují. Příkladem jsou magnetické ztráty ovlivňující oteplení a naopak nárůst Joulových ztrát s teplotou vlivem změny odporu vinutí, ovlivňují elektro-magnetické vlastnosti elektrického stroje.

Seznam symbolů

A	chladicí plocha	$[m^2]$
B_z	šířka žebor rotorové hvězdy	$[m]$
c	tepelná kapacita tělesa	$[W \cdot s \cdot K^{-1}]$
C	vektor tepelných kapacit	$[W \cdot s \cdot K^{-1}]$
C	měrná tepelná kapacita	$[W \cdot s \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$
D	průměr kanálu	$[m]$
D_{1r}	vnitřní průměr rotorového svazku	$[m]$
D_h	průměr hřídele	$[m]$
G	tepelná vodivost vedením	$[W \cdot K^{-1}]$
G	matice vodivosti	$[W \cdot K^{-1}]$
G_f	matice vodivosti toku chladiva	$[W \cdot K^{-1}]$
$G_{p,pQ}$	matice vodivosti popisující vzájemnou interakci solid-fluid	$[W \cdot K^{-1}]$
G_s	matice vodivosti „solid“ částí	$[W \cdot K^{-1}]$
K	hydraulický odpor	$[N \cdot s^2 \cdot m^{-8}]$
K	součinitel konvekce	$[W \cdot K^{-1,25}]$
L	délka kanálu	$[m]$
L_{fe}	délka svazku plechů	$[m]$
n_r	otáčky rotoru	$[\text{min}^{-1}]$
N_z	počet žebor rotorové hvězdy	$[-]$
P_0	ztráty za studena	$[W]$
q	tepelný tok	$[W]$
Q	průtočné množství	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
Q_e	průtočné množství vnějšího ventilačního okruhu	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
Q_i	průtočné množství vnitřního ventilačního okruhu	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
R	součinitel radiace (sálání)	$[W \cdot K^{-4}]$
S	průřez	$[m^2]$
S_{rh}	průřez mezi žebry rotorové hvězdy	$[m^2]$
t	čas	$[s]$
u	obvodová rychlost	$[m \cdot s^{-1}]$
v_{ax}	střední axiální rychlost proudění v kanále	$[m \cdot s^{-1}]$
V	objem	$[m^3]$
z	vektor tepelných toků	$[W]$
α	součinitel přestupu tepla	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
δ	velikost vzduchové mezery	$[m]$
ε	teplotní součinitel elektrického odporu	$[K^{-1}]$
ϑ	teplota	$[^\circ C]$
ϑ_{in}	vstupní teplota chladiva	$[^\circ C]$
ϑ_o	teplota okolí	$[^\circ C]$
ϑ_{out}	výstupní teplota chladiva	$[^\circ C]$
ϑ_s	střední teplota	$[^\circ C]$
ϑ_u	střední teplota toku chladiva	$[^\circ C]$
θ	parametr diferenciální rovnice	$[K \cdot m^{-2}]$
χ	parametr diferenciální rovnice	$[m^{-1}]$
λ	součinitel tření	$[-]$
λ	měrná tepelná vodivost	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
λ_0	součinitel tření nerotujícího kanálu	$[-]$
ξ	součinitel vnitřního tepelného odporu	$[-]$

ξ	odporový součinitel	[-]
$\xi_0^{i,e}$	odporový součinitel vstupu nebo výstupu	[-]
ξ_{gap}	odporový součinitel tření ve vzduchové mezeře	[-]
ξ_r	odporový součinitel rotorového kanálu	[-]
ξ_{rh}	odporový součinitel vstupu do rotorové hvězdy	[-]
ξ_μ	odporový součinitel zaoblení hran a kontrakce	[-]
ρ	hustota	[kg·m ⁻³]
τ	tepelná časová konstanta	[s]

Použitá literatura

Použité zdroje, ze kterých bylo čerpáno při realizaci této práce, jsou uvedeny v plné verzi habilitační práce.

Související publikace autora

- [A1] Vlach, R.: Tepelné procesy v mechatronických soustavách. Skripta. VUT Brno, 2009.
- [A2] Vlach, R.: Heating Prediction of Electric Machine Using Neural Network. MENDEL 2010 - 16th International Conference on Soft Computing. Brno. 2010. p. 298 - 302. ISBN 978-80-214-4120-0.
- [A3] Vlach, R.: Design of Ventilation System of Machine Type with the 1250mm Stator Core Outer. In International conference on "Low Voltage Electrical Machine". Brno. 2008. p. 122 - 123. ISBN 978-80-214-3795-1.
- [A4] Vlach, R. Computational and Experimental Modeling of DC Machine cooling by Heat Pipe. In New Aspects of Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment. Rhodes, Greece, WSEAS Press. 2008. p. 98 - 100. ISBN 978-960-6766-97-8.
- [A5] Vlach, R.: DC Machine Cooling by Heat Pipe. In LVEM - Low Voltage Electrical Machines 2007. Brno. 2007. p. 108 - 109. ISBN 978-80-214-3560-5.
- [A6] Vlach, R. Thermal model of control non-convective winding slot cooling by water. In Modeling and optimization of physical systems. 2007. p. 157 - 162.
- [A7] Vlach, R.: Predictor for Control of Stator Winding Water Cooling of Synchronous Machine. In Recent Advances in Mechatronics. Mech. Berlín, Springer. 2007. p. 190 - 194. ISBN 978-3-540-73955-5.
- [A8] Vlach, R.; Grepl, R.; Krejčí, P.: Control of Stator Winding Slot Cooling by Water Using Prediction of Heating. In ICM2007 4th IEEE international Conference on Mechatronics. Kumamoto, Japan, IEEE. 2007. p. 5 - 9. ISBN 1-4244-1184-X.
- [A9] Vlach, R. : Drive of Stator Winding Slot Cooling by Water, International Conference on Electrical Machines ICM2006, Chania, Crete, 2.9-5.9. 2006.
- [A10] Vlach, R.: Control of Stator Winding Slot Cooling by Water. In Simulation Modeling of Mechatronics systems II. mechatronika. 2006. p. 75 - 83. ISBN 80-214-3341-8.
- [A11] Vlach R., Krejčí P., Grepl R.: New Approach of electric machine Winding Water Cooling, Engineering Mechanics 2006, Svratka, Ústav termomechaniky AVČR. 2006, ISBN 80-86246-27-2.
- [A12] Vlach, R., Grepl, R., Krejčí, P.: Řízení nekonvenčního chlazení statorového vinutí vodou. In Engineering Mechanics 2006. Praha. 2006. p. 424 - 425. ISBN 80-86246-27-2.
- [A13] Vlach, R.: Computational and Experimental Modelling of Non-convective Winding Slot Cooling. Inženýrská mechanika - Engineering Mechanics. 2005. 2005(12). p. 209 - 214. ISSN 1210-2717.
- [A14] Vlach, R.: Parametric Model of Synchronous Machine Winding Cooling by Heat Pipe. In Engineering Mechanics 2005. Praha. 2005. p. 341 - 342. ISBN 80-85918-93-5.
- [A15] Vlach, R., Ondrůšek, Č., Grepl, R.: Computational and Experimental Simulation of Synchronous Generator Ventilation, International Conference ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Conference 2004, San Diego, California, USA, 25.-29. 7. 2004, p. 139-144, ISBN 0-7918-4669-5.
- [A16] Vlach, R., Ondrůšek, Č.: Comparison of Synchronous Machine Cooling Using Heat Pipe and Water Cooling, 5th International Conference Mechatronics 2004, Warsaw, Poland, September 23.-25. 2004, p. 195-196, ISSN 0033-2089.
- [A17] Vlach, R.: Chlazení elektrických strojů, 2004, Brno, ISBN 80-214-2848-1.

Abstrakt

Tato práce se zabývá rozborem současných trendů v oblasti modelování a simulace tepelných procesů v elektrických strojích. Hlavní důraz je kladen na možnost začlenění nových výpočtových metod do komplexního návrhu elektrického stroje při zachování velmi dobré přesnosti. Neobvyklá metoda náhradní tepelné sítě je založena na analytickém řešení a bere v úvahu i trojrozměrné vedení tepla v modelovaných částech elektrického stroje. V práci je popsáno sestavení matematického modelu trojrozměrné tepelné sítě vzájemně propojené s libovolně větvenou tepelnou sítí toku chladiva. Nově vyvinutá metoda trojrozměrné tepelné sítě byla aplikována na reálných strojích a ověřena porovnáním s výsledky oteplovacích zkoušek.

V oblasti vyhodnocení oteplovací zkoušky je v této práci vytvořen algoritmus pro predikci ustálené (oteplování) nebo počáteční (ochlazování) teploty z části průběhu teploty během oteplovací zkoušky. Celý algoritmus je podložen fyzikálním základem sdílení tepla, která mohou nastat v elektrických strojích případně i jiných zařízeních.

Nejpodstatnějšími přínosy práce jsou: vývoj metody trojrozměrné tepelné sítě, umožňující řešení ustálených a přechodových stavů; snadná algoritmizace komplexní tepelné sítě (solid-fluid), která je obecně použitelná pro popis tepelného stavu jakéhokoliv typu elektrického stroje i jiných technických zařízení; a možnost snadné aplikace různých optimalizačních metod na komplexní tepelný model.

Abstract

This thesis deals with the analysis of current trends in modelling and simulation of thermal processes in electrical machines. The main accent is placed on the possible integration of new computational methods to enable complex design of electrical machine while keeping very good accuracy. A novel method of thermal network is based on analytical solutions and takes into account the three-dimensional heat conduction in modelled parts of electrical machines. There is described the compilation of a mathematical model of three-dimensional thermal network interconnected with arbitrarily branched thermal network of air flow. The new three-dimensional thermal network method was applied to real machines and verified by comparison with the results of heating tests.

In this thesis is developed algorithm for prediction of the steady state (heating) or the initial (cooling) temperature from the part of temperature curve during the heating test. The whole algorithm is supported by physical principles of heat transfer, which can occur in electrical machines and other devices.

The most important contributions of the work are development of three-dimensional thermal network method solving steady and transient states; the simple algorithmization of complex thermal network (solid-fluid), which is generally applicable for describing of the thermal state of any type of electrical machines and other technical devices; and possibility of easy application of different optimization methods for complex thermal model.